

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra Elektroniky

Použití statistické a toleranční analýzy  
v prostředí OrCAD

Statistical and Tolerance Analysis  
in OrCAD

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Jan Mojžíšek**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Použití statistické a toleranční analýzy v prostředí OrCAD  
Statistical and Tolerance Analysis in OrCAD

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište vlastnosti a možnosti použití statistické a toleranční analýzy v prostředí OrCAD
2. Podle pokynů vedoucího práce demonstруйте použití analýzy na jednoduchých příkladech
3. Sestavte laboratorní úlohu se zaměřením na použití statistické a toleranční analýzy v prostředí OrCAD

Seznam doporučené odborné literatury:

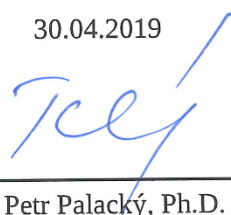
Biolek, D., Kolka, Z.: Modelování a simulace pomocí PSpice. Brno: Tribun EU, 2011  
Cadence Design Systems, Inc.: PSpice Users Guide. Cadence Design systems, Portland, 2000.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne ..... 30. 4. 2019 .....

.....  
Podpis studenta

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D. za užitečné rady a podporu při vytváření této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Cílem práce je popis použití statistické a toleranční analýzy v prostředí OrCAD. V první části textu jsou charakterizovány základní a rozšířené analýzy. Druhá část se zabývá knihovnami součástek a možnostmi nastavení parametrů modelů pro rozšířené analýzy. Stručně je také popsán základ teorie statistiky a pravděpodobnosti související s uvedenými analýzami. V třetí části je postupně popsána citlivostní analýza, analýza nejhoršího případu a analýza výtěžnosti výroby. U jednotlivých analýz jsou uvedeny jednoduché příklady s detailním popisem potřebných nastavení. V příkladech převažují analýzy analogových filtrů. Čtvrtá část obsahuje další ukázkové simulace. Pátá část obsahuje sestavenou laboratorní úlohu a syllab z oblasti využití toleranční analýzy.

## **Klíčová slova**

OrCAD, PSpice, PSpice AA, statistická analýza, toleranční analýza, citlivostní analýza, analogové filtry, Monte Carlo, analýza nejhoršího případu, toleranční design

## **Abstract**

The purpose of this work is to describe the use of statistical and tolerance analysis in OrCAD. In the first part of the text, basic and advanced analyses are characterized. The second part discusses component libraries and options for setting parameters of models for extended analyses. It also briefly describes the basis of the theory of statistics and probabilities related to these analyses. In the third part, the sensitivity analysis, the worst-case analysis and the Monte Carlo analysis are described. Simple examples with detailed descriptions of the necessary settings are given for each analysis. In the examples, analogue filter analysis predominate. The fourth section contains additional sample simulations. The fifth part contains laboratory task and a syllabus from the area of tolerance analysis.

## **Key Words**

OrCAD, PSpice, PSpice AA, statistical analysis, tolerance analysis, sensitivity analysis, analog filters, Monte Carlo, worst-case analysis, tolerance design

## Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	6
Seznam ilustrací a seznam tabulek .....	7
Úvod .....	9
1 Prostředí OrCAD .....	10
1.1 Analýzy v programu PSpice .....	10
1.2 Základní analýzy .....	10
Stejnoseměrný pracovní bod (BiasPoint) .....	10
Analýza v časové oblasti (Transient) .....	11
Stejnoseměrná analýza (DC Sweep) .....	11
Střídavá analýza (AC Sweep) .....	11
1.3 Rozšířené analýzy .....	11
Citlivostní analýza (Sensitivity analysis) .....	11
Optimalizace (Optimizer) .....	12
Analýza namáhání součástek (Smoke analysis) .....	12
Analýza výtěžnosti výroby (Monte Carlo) .....	12
Parametric Plotter .....	12
2 Knihovny a modely součástek pro rozšířené analýzy .....	13
2.1 Parametrizované modely .....	14
2.2. Základní pojmy statistiky a pravděpodobnosti .....	16
3 Statistická a toleranční analýza .....	22
3.1 Toleranční analýza .....	22
3.2 Citlivostní analýza (Sensitivity Analysis) .....	26
3.3 Analýza nejhoršího případu (Worst-case) .....	32
3.4 Analýza Monte Carlo .....	36
4 Další příklady .....	46
5 Sylab a laboratorní úloha .....	55
5.1 Sylab .....	55
5.2 zadání laboratorní úlohy .....	60
5.3 Vzorové řešení .....	61
6 Závěr .....	65
Seznam použité literatury .....	66
Seznam příloh .....	67

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol, zkratka	Vysvětlení
AC	Amplitude Current – střídavý proud
CDF	Cumulative Distribution Function
DC	Direkt current – stejnosměrný proud
LMB	Left mouse button – levé tlačítko myši
PDF	Probability Density Function
PSpice AA	PSpice Advanced Analysis, modul rozšířených analýz
RMB	Right mouse button – pravé tlačítko myši
$S_{abs}$	Absolutní citlivost
$S_{rel}$	Relativní citlivost
$U$ [V]	napětí
$I$ [A]	proud
$e$	Eulerovo číslo ( $e = 2,718281828\dots$ )
$f$ [Hz]	frekvence
$\log()$	Dekadický logaritmus
$t$ [s]	Čas
$\pi$	Ludolfovo číslo ( $\pi = 3,141592653\dots$ )

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Název	Strana
Obr. 2.1: PSpice Model Editor.	13
Obr. 2.2: Okno pro zadání filtru vyhledávání součástek.	15
Obr. 2.3: Prvek VARIABLES z knihovny pspice_elem.	16
Obr. 2.4: Průběh a) PDF a b) CDF pro Gaussovo rozdělení.	19
Obr. 2.5: Hustota pravděpodobnosti Gaussova rozdělení pro různé hodnoty směrodatné odchylky.	20
Obr. 2.6: Průběh a) PDF a b) CDF pro Uniformní rozdělení.	21
Obr. 3.1: Znázornění a) prostoru tolerancí b) oblasti přijatelnosti.	24
Obr. 3.2: Možné polohy prostoru tolerancí a přijatelnosti.	24
Obr. 3.3: Toleranční schéma kmitočtových filtrů: a) dolní propust, b) horní propust, c) pásmová propust, d) pásmová zádrž. [5]	25
Obr. 3.4: Schéma ke stanovení citlivosti stejnosměrného pracovního bodu.	26
Obr. 3.5: Citlivost stejnosměrného pracovního bodu – nastavení simulačního profilu.	27
Obr. 3.6: Schéma pasivního filtru 5. řádu k určení citlivosti s modulem rozšířených analýz.	29
Obr. 3.7: Nastavení střídavé analýzy.	29
Obr. 3.8: Výsledek střídavé analýzy Caueova filtru.	30
Obr. 3.9: Výsledky citlivostní analýzy v modulu rozšířených analýz.	30
Obr. 3.10: Schéma s globálně zadanými tolerancemi pro 3. příklad.	33
Obr. 3.11: nastavení simulačního profilu pro analýzu nejhoršího případu.	34
Obr. 3.12: Nastavení hledané hodnoty pro analýzu nejhoršího případu.	35
Obr. 3.13: Výsledky citlivostní analýzy v modulu PSpice AA.	36
Obr. 3.14: Pracovní postup při analýze Monte Carlo.	38
Obr. 3.15: Zapojení pásmové propusti 4. řádu.	39
Obr. 3.16: Nastavení simulace Monte Carlo.	39
Obr. 3.17: Amplitudové charakteristiky obvodu na obrázku 10 – analýza Monte Carlo.	40
Obr. 3.18: Dialogové okno spouštění nástroje Performance Analysis (Trace > Performance Analysis).	40
Obr. 3.19: Histogram vytvořený nástrojem Performance Analysis.	41
Obr. 3.20: Zadání uživatelské distribuce.	42
Obr. 3.21: Nastavení analýzy Monte Carlo v modulu rozšířených analýz.	43
Obr. 3.22: Nastavení ukládání dat v modulu rozšířených analýz.	44
Obr. 3.23: Výsledky analýzy Monte Carlo v modulu rozšířených analýz.	44
Obr. 3.24: Distribuční funkce v modulu rozšířených analýz.	45
Obr. 4.1: Různé typy filtru typu dolní propust.	47
Obr. 4.2: Výsledek analýzy Monte Carlo – PDF pro mezní kmitočet filtrů typu a) Bessel b) Butterworth a c) Čebyšev.	49
Obr. 4.3: Schéma ukázkového projektu pro demonstraci rozšířených analýz.	50
Obr. 4.4: Model editor s otevřeným parametrizovaným modelem tranzistoru 2N5179.	50
Obr. 4.5: Průběhy vstupního a výstupního napětí zesilovače.	51
Obr. 4.6: Výsledek šumové analýzy – modře šumové napětí červeně a šumové číslo.	51
Obr. 4.7: Výsledky citlivostní analýzy zesilovače.	52
Obr. 4.8: Zdroj konstantního proudu.	52
Obr. 4.9: Nastavení analýzy nejhoršího případu pro Howlandův zdroj proudu.	53

Obr. 5.1: Nastavení analýzy citlivosti stejnosměrného pracovního bodu.	56
Obr. 5.2: Citlivostní analýza v modulu rozšířených analýz.	57
Obr. 5.3: Nastavení analýzy nejhoršího případu.	57
Obr. 5.4: Nastavení analýzy Monte Carlo.	58
Obr. 5.5: Výsledky analýzy Monte Carlo v modulu rozšířených analýz.	59
Obr. 5.6: Schéma transistorového zesilovače.	60
Obr. 5.7: Průběhy vstupního (černě) a výstupního (červeně) napětí.	61
Obr. 5.8: Nastavení DC analýzy pro zjištění citlivosti.	62
Obr. 5.9: Výsledky analýzy nejhoršího případu pro zesilovač.	62
Obr. 5.10: Průběhy vstupního a výstupního napětí zesilovače pro nejhorší případ (modře maximální, zeleně minimální hodnota zesílení).	63
Obr. 5.11: Dolní propust 4. řádu.	63
Obr. 5.12: Amplitudové charakteristiky dolní propusti.	64
Obr. 5.13: Fázové charakteristiky dolní propusti.	64
Tab. 1: Parametry modelů pro rozšířené analýzy.	14
Tab. 2: Tolerance odporových řad.	21
Tab. 3: Výsledky citlivostní analýzy stejnosměrného pracovního bodu.	35
Tab. 4: Výsledky citlivostní analýzy pro mezní kmitočet v příkladu 5.	48
Tab. 5: Výsledky citlivostní analýzy pro minimální útlumu v příkladu 5.	48
Tab. 6: Výsledky analýzy Monte Carlo.	48
Tab. 7: Úprava hodnot při analýze nejhoršího případu pro korelované tolerance.	54
Tab. 8: Úprava hodnot při analýze nejhoršího případu pro nekorelované tolerance.	54
Tab. 9: Výsledky citlivostní analýzy.	62



## Úvod

Tato práce se zabývá statistickou a toleranční analýzou, které lze provádět v prostředí OrCAD. Simulace umožňují urychlit a zjednodušit návrh obvodů, což vede ke snížení nákladů spojených s vývojem a umožňuje prozkoumat celou škálu možných provedení. Simulace navíc umožňují prozkoumat vlivy jako je teplota nebo tolerance použitých částí, které by se u reálných prototypů prověřovaly velmi obtížně. [3]

S rostoucími nároky na spolehlivost zejména při aplikacích v automobilech, kosmonautice a medicíně je důležité dostatečně posoudit kvalitu návrhu. Požadavky na spolehlivost jsou kladeny s ohledem na funkčnost, životnost a elektromagnetickou kompatibilitu. Mezi zásadní požadavky patří také optimalizace výroby s ohledem na výrobní cenu.

Při simulacích elektronických obvodů se obecně vychází ze zjednodušeného matematického modelu, který do jisté míry aproximuje skutečné zapojení. Ani správné použití simulačního softwaru nezaručuje shodu výsledků simulace a laboratorního měření. Pro správnost simulace jsou zásadní použité modely součástek, nastavení analýzy a v neposlední řadě také použitá numerická metoda. Při zkoumání výsledků je důležité rozumět zkoumanému modelu a výsledky na základě zkušeností posoudit a správně interpretovat.

Zlepšení kvality výstupních dat prováděné simulace lze dosáhnout pomocí metod využívajících prostředky statistiky a pravděpodobnosti. Statistická a toleranční analýza využívá tyto prostředky k určování oblastí charakteristik a k ověření funkčnosti technického návrhu.

Cílem této práce je názorně popsat vlastnosti a provedení uvedených analýz v prostředí OrCAD a tím poskytnout ucelený úvod do této problematiky.

V první části práce jsou stručně popsány základní analýzy, které tvoří základ pro statistické a toleranční analýzy. V druhé části je pozornost věnována modelům součástek z hlediska možností zadávání tolerancí. Následuje základ teorie statistiky a pravděpodobnosti ve kterém jsou shrnuty základní pojmy, a teorie je vztažena k tématu práce. Popsaný matematický aparát je důležitý jak z hlediska zadání simulace, tak i z hlediska vyhodnocení výsledků.

Třetí část práce obsahuje stručný úvod do problematiky tolerančního designu. Dále je uveden popis jednotlivých metod statistické a toleranční analýzy dostupných v prostředí OrCAD. K jednotlivým typům simulací je vždy uveden jednoduchý příklad obsahující popis nastavení analýzy. Čtvrtá část obsahuje další příklady k využití popsanych analýz. V páté části je uveden sylab a laboratorní úloha včetně vzorového vypracování k použití ve výuce.

# 1 Prostředí OrCAD [10]

Sada nástrojů OrCAD je celek umožňujících návrh a simulace analogových, smíšených a programovatelných obvodů, součástí jsou také nástroje na tvorbu technické dokumentace včetně návrhů a optimalizace tištěných spojů. Některé programy obsažené v sadě OrCAD jsou v následujícím seznamu.

- OrCAD Capture – Editor schémat a schématických značek sloužící jako vstupní bod pro simulování. Součástí je několik modulů jako je například systém pro správu komponentů OrCAD CIS (component information system).
- OrCAD PCB Designer – Nástroj pro návrh plošných spojů a práci s knihovnami pouzder. Součástí jsou nástroje pro routing a autorouting.
- OrCAD PSpice Designer – Obsahuje simulační jádro PSpice a umožňuje provádět standardní SPICE simulace. Provedení tohoto programu je modulární, a kromě simulačního jádra PSpice obsahuje například postprocesor Probe sloužící k zobrazení a zpracování výsledků simulací. Mezi další části patří Model Editor, Optimizer a modul Advanced Analysis pro rozšířené analýzy.
- OrCAD PCB SI – Modul editoru Capture určený pro analýzu integrity signálů.

Nástroje statistické a toleranční analýzy, které jsou tématem této práce jsou dostupné v rámci programu PSpice AD. Modul rozšířených analýz PSpice AA obsahuje více možností pro statistickou a toleranční analýzu. Pro vypracování této práce byl použit OrCAD verze 16.6.

## 1.1 Analýzy v programu PSpice

Program OrCAD PSpice umožňuje provádět analýzy typu SPICE (PSpice je SPICE kompatibilní) pro analogové a smíšené obvody. Pro simulaci je nutné dodržet pravidla kreslení schémat a správně nastavit parametry použitých komponentů včetně zdrojů. Dále je nutné zvolit v nastavení simulačního profilu jednu ze čtyřech základních analýz.

## 1.2 Základní analýzy

### Stejnoseměrný pracovní bod (BiasPoint)

Jedná se o základní analýzu, která vypočítá proudy všemi větvemi, napětí ve všech uzlech a hodnoty ztrátových výkonů všech součástek. Vypočtená hodnota pracovního bodu je použita pro další analýzy. Vypočtené hodnoty pracovního bodu jsou uvedeny formou tabulky ve výstupním souboru a lze je zobrazit v editoru Capture.

## **Analýza v časové oblasti (Transient)**

Tato analýza hledá časové průběhy obvodových veličin – napětí a proudů. Jsou uplatněny časové parametry zdrojů. V případě absence časových parametrů se použijí DC parametry. Souběžně s časovou analýzou lze také provést spektrální analýzu. Simulace vždy začíná v čase 0 a probíhá do času nastaveného v simulačním profilu. Příkladem použití je analýza přechodového děje, například odezva na jednotkový skok. Analýza v časové oblasti se také používá pro simulace číslicových obvodů.

## **Stejnoseměrná analýza (DC Sweep)**

Cílem této analýzy je vypočítat pracovní bod obvodu v závislosti na krokování hodnoty zdroje napětí, zdroje proudu, teploty, globálního parametru nebo parametru modelu součástky. Lze také nastavit krokování dvou parametrů (secondary sweep). V případě nastavení krokování dvou parametrů simulace probíhají ve vnořené smyčce. Pro každý krok jednoho parametru simulace proběhne pro všechny hodnoty parametru druhého. Příkladem využití tohoto postupu je vykreslení výstupních charakteristik tranzistoru. Hodnotu při krokování lze měnit lineárně, logaritmicky, nebo podle výčtu hodnot. Před simulací se z obvodu odstraní setrvačné prvky. Induktory se nahradí zkratem a kapacitory se neuvažují.

## **Střídavá analýza (AC Sweep)**

Dochází k rozmitání frekvence nezávislého zdroje napětí nebo proudu. Výsledkem je odezva obvodu na harmonický signál – amplitudy a fázové posuny napětí a proudů v závislosti na rozmitané frekvenci. Před simulací je obvod linearizován v okolí stejnosměrného pracovního bodu. Všechna napětí a všechny proudy mají harmonické průběhy. Střídavou analýzu lze také použít i u obvodu, který je slabě nelineární (nelinearita je zde parazitní vlastností). Pro nelineární obvody tato simulace proběhne bez chybového hlášení a může vrátit chybné výsledky. Povolení šumové analýzy umožní nasimulovat šum způsobený polovodičovými součástkami a tepelný šum rezistorů. Typickým příkladem využití střídavé analýzy je simulace kmitočtových filtrů s cílem zobrazit amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristiku.

## **1.3 Rozšířené analýzy**

Program PSpice obsahuje kromě možností provedení základních analýz modul pro rozšířené analýzy PSpice AA – PSpice Advanced Analysis. Jedná se o nástroje využívající výsledků základních analýz k dalšímu zlepšení produktivity při návrzích elektrických obvodů.

Vedle souboru se simulačním profilem (.sim) je rozšířena analýza, která je prováděna v rámci modulu PSpice AA specifikována v samostatném souboru (.aap).

## **Citlivostní analýza (Sensitivity analysis)**

Slouží k identifikaci prvků, které sledovanou charakteristiku obvodu ovlivňují nejvíce. Pracuje s výsledky analýzy v časové oblasti, stejnosměrné a střídavé analýzy. Výsledkem tohoto nástroje je zhodnocení vlivu jednotlivých komponentů a srovnání s ostatními komponenty. Výsledků lze použít pro optimalizaci výroby – stanovení optimálních tolerancí pro jednotlivé komponenty. Pokud je citlivost sledované charakteristiky vůči danému komponentu malá, potom je z hlediska efektivity výroby vhodné toleranční pásmo rozšířit. A opačně pro vysokou citlivost toleranční pásmo zúžit.

## **Optimalizace (Optimizer)**

Pomocí nástroje optimalizace se upravují uživatelem definované číselné hodnoty parametrů prvků analogových obvodů tak, aby bylo dosaženo požadovaného chování obvodu. Funkcí tohoto nástroje je tedy řešit zadaný problém optimalizace, který může být například hledání minima účelové funkce. Stejně jako citlivostní analýza využívá výsledků z časové, stejnosměrné nebo střídavé analýzy. Optimalizace není určena pro stanovení prvotního odhadu hodnot parametrů, je nutné vyjít z výpočtů a zkušeností. Dále je problematické použití optimalizace na nestabilní obvod, kde malá změna parametrů vede ke změně stavu.

## **Analýza namáhání součástek (Smoke analysis)**

Tento nástroj slouží k posouzení namáhání součástek, které by mohlo skončit selháním celého zapojení. Sledované parametry mohou zahrnovat ztrátový výkon, teplotou nebo překročení maximálních napětí nebo proudů. Pro provedení je nutné, aby měly použité modely parametry definující bezpečné provozní oblasti včetně maximálních hodnot. Tyto parametry jsou specifikovány výrobcí. Samotná analýza spočívá v porovnání výsledků simulace s těmito limity. Analýzu je vhodné použít na konci návrhového procesu pro finální ověření před realizací.

## **Analýza výtěžnosti výroby (Monte Carlo)**

Tato analýza slouží ke statistickému posouzení chování obvodu, lze ji použít v kombinaci s časovou, stejnosměrnou nebo se střídavou analýzou. Podrobněji bude popsána v následujícím textu.

## **Parametric Plotter**

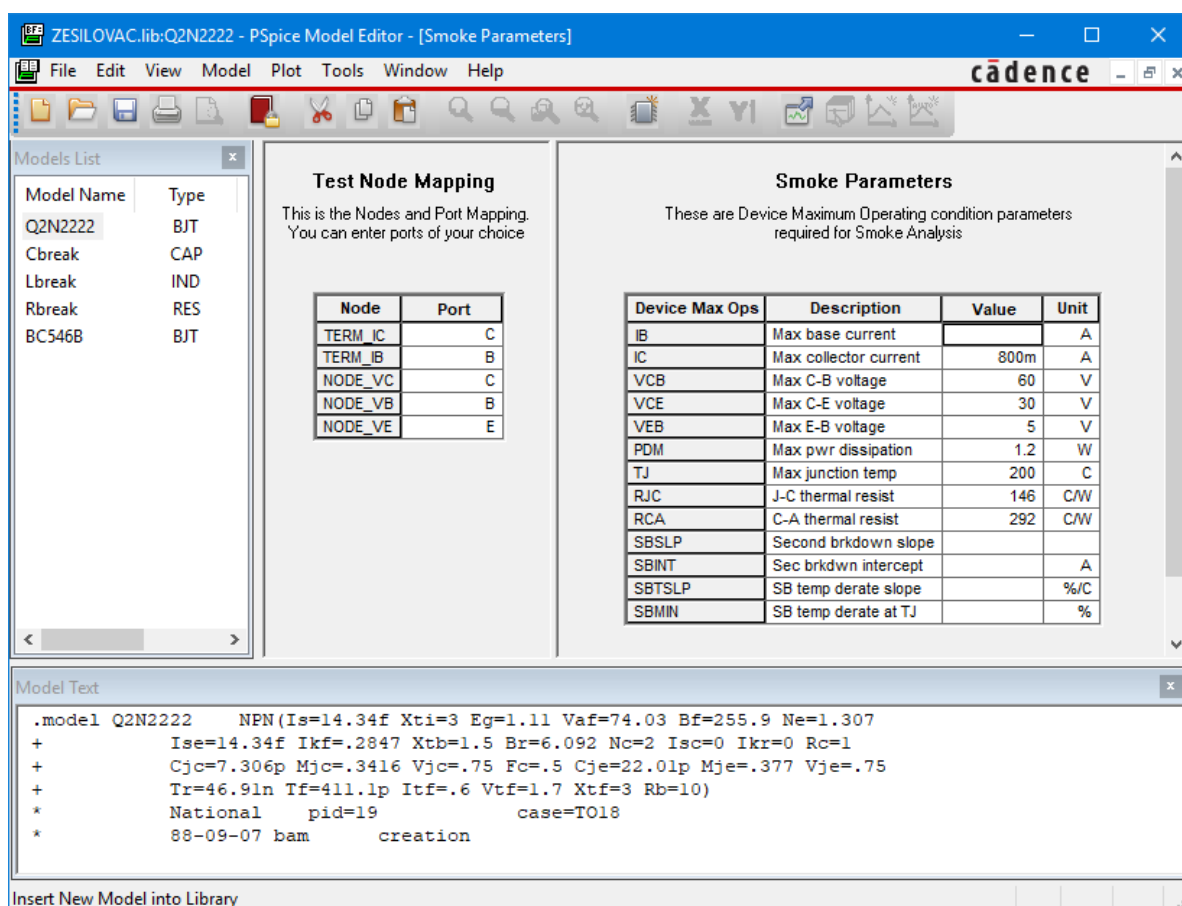
Nástroj Parametric Plotter umožňuje rozmítat více parametrů obvodu a obsahuje také možnosti pro přehledné grafické znázornění výsledků rozmítání. Je možné rozmítat libovolné množství parametrů v libovolných kombinacích. Výsledky lze také zobrazit v editoru Probe nebo formou tabulky. Hodnoty jednotlivých parametrů lze rozmítat rozdílnými způsoby (lineárně, logaritmicky, výčtem hodnot). Výstupem jsou hodnoty zadaných měřicích funkcí.

## 2 Knihovny a modely součástek pro rozšířené analýzy [10], [1]

Modely součástek jsou pro simulace stěžejní součástí simulovaného obvodu. Modely obsahují informaci o typu součástky a číselné parametry v definovaném formátu. Parametr modelu slouží k vyjádření fyzikální vlastnosti součástky. Množina parametrů tvoří model. Parametry mohou být zadány číselnou hodnotou, nebo matematickým výrazem s proměnnou. V druhém případě je potřeba definovat hodnotu dané proměnné.

Program PSpice obsahuje modely uspořádané do knihoven. Knihovna obsahující schématické značky pro editor Capture je označena příponou olb. Knihovna s modely součástek pro simulátor je označena příponou lib. Počet dostupných modelů v Cadence PSpice Model Library přesahuje 33 000. Další modely lze získat od výrobců součástek. Výpis obsahu knihoven je dostupný v souboru PSpice Library List. I přes značné množství dostupných modelů může nastat případ, kdy je zapotřebí vytvořit nový, nebo upravit stávající. K vytváření a úpravě modelů slouží PSpice Model Editor, který je součástí prostředí OrCAD. Modely jsou zapsány ve standardním formátu SPICE. [2]

Množství parametrů se u jednotlivých modelů může lišit. Jako příklad je zde uveden model bipolárního tranzistoru Q2N2222, otevřený v editoru modelu na obrázku 2.1. Ve spodní části okna je model zapsán v textové podobě, jedná se o zápis v jazyce SPICE.



Obr. 2.1: PSpice Model Editor.

## 2.1 Parametrizované modely

Modely pro rozšířené analýzy jsou dostupné v knihovnách modelů pro rozšířené analýzy. Obsahem těchto knihoven jsou parametrizované a standardní modely. Většina modelů je parametrizována.

K provedení rozšířené analýzy musejí mít použité prvky specifikován jeden nebo více z následujících parametrů:

- Tolerance
- Distribuce
- Optimalizovatelné parametry
- Parametry namáhání součástek

Parametry pro rozšířenou analýzu nemusí být specifikovány u všech použitých součástek. V takovém případě se analýza provede jen na součástkách s nastavenými parametry pro rozšířené analýzy. Ostatní součástky se pro výpočty neuvažují. Využití uvedených parametrů v rozšířených analýzách je v tabulce 1.

Tab. 1: Parametry modelů pro rozšířené analýzy.

Analýza	Parametry
Citlivostní	tolerance
Monte Carlo	tolerance, distribuce
Optimalizace	optimalizovatelné parametry
Namáhání součástek	parametry namáhání součástek

Knihovny s parametrizovanými prvky jsou v adresáři `..\tools\pspice\library`. Při vkládání součástek v editoru Capture jsou v okně Place Part indikovány vlastnosti pomocí ikon.




- Má model pro simulaci PSpice.

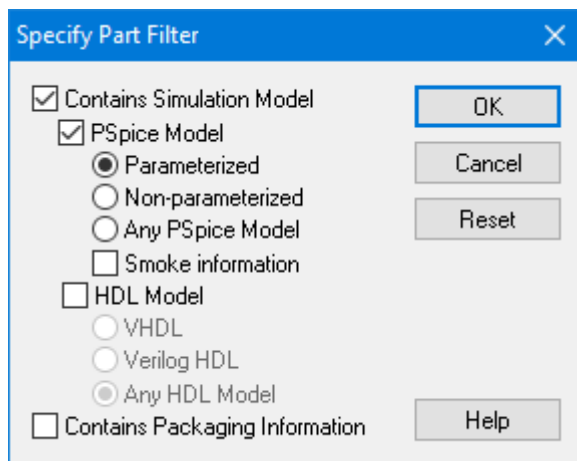


- Má parametrizovaný model.



- Má pouzdro pro PBC.

Vyhledávat součástky podle jejich definovaných modelů lze kliknutím na ikonu trychtýře  pod vyhledávacím polem a následnou volbou modelů v okně Specify Part Filter. Tak lze například vybrat součástky s parametrizovanými modely viz obr. 2.2.



Obr. 2.2: Okno pro zadání filtru vyhledávání součástek.

Knihovny a modely součástek je možné upravovat, vytvářet a importovat. Schématickou značku lze upravit přímo v editoru Capture. Daná značka se nejprve označí kliknutím LMB, následně se se na značku klikne RMB a ve zobrazené nabídce se zadá možnost *Edit Part*. Značka je takto upravena lokálně pro aktuální projekt.

### Tolerance a distribuce

Pasivní prvky z knihovny analog mají parametr pro toleranci (TOLERANCE) a distribuci (DIST). Tyto tolerance jsou symetrické. To znamená, že například rezistor s hodnotou 100  $\Omega$  a tolerancí 10 % má hodnotu v rozsahu 90  $\Omega$  až 110  $\Omega$ .

Zavést tolerance pro pasivní prvky umožňují také prázdné modely z knihovny breakout. Prázdné modely jsou například pro prvky R, L a C zapsány takto:

```
.model Rbreak RES R=1
```

```
.model Lbreak IND L=1
```

```
.model Cbreak CAP C=1
```

Zápis je uveden ve tvaru `.model <název_modelu> <typ> <hodnoty>`. Jsou dva typy tolerancí, které lze k modelům přidat. Prvním typem je dev. Instance modelů s tolerancí dev a stejným názvem modelu budou mít vzájemně nezávislé náhodné hodnoty vybrané z tolerančního intervalu. Tolerance zadaná prvkům R, L a C z knihovny analog se do jejich modelu vloží jako parametr dev. Parametr lot je tolerance, vztahující se ke skupině instancí se stejným názvem modelu, která určuje vzájemně závislou změnu hodnot. Například dvě součástky v jednom pouzdře mají vygenerované náhodné vzájemně nezávislé (nekorelující) hodnoty podle tolerance dev a při změně teploty se oběma dané hodnoty změní stejně podle tolerance lot. Významně se korelace tolerancí projevuje v integrovaných obvodech. Zadání hodnot lot a dev pro výše uvedený model Cbreak může vypadat následovně:

```
.model Cbreak CAP C=1 lot = 5% dev = 10%
```

Tolerance se zapisují za daný parametr, jejich hodnotu lze uvést jako relativní se znakem procenta, nebo absolutní bez něj. Výchozí distribuce je uniformní, lze zadat i Gaussovu, případně vlastní.

.model Cbreak CAP C=1 lot/uniform = 5% dev/gauss = 10%

Pasivní prvky z knihovny pspice\_elem obsahují nesymetrické tolerance POSTOL a NEGTOLO. POSTOL je parametr, který odpovídá kladné toleranci např. +5 %. Parametr NEGTOLO odpovídá záporné toleranci např. -5 %. Pro hromadné zadávání tolerancí obsahuje knihovna pspice\_elem prvek VARIABLES.

## Advanced Analysis Properties

### Tolerances:

RTOL = 0  
CTOL = 0  
LTOL = 0  
VTOL = 0  
ITOL = 0

### Smoke Limits:

RMAX = 0.25	ESR = 0.001
RSMAX = 0.0125	CPMAX = 0.1
RTMAX = 200	CVN = 10
RVMAX = 100	LPMAX = 0.25
CMAX = 50	DC = 0.1
CBMAX = 125	RTH = 1
CSMAX = 0.005	
CTMAX = 125	
CIMAX = 1	
LMAX = 5	
DSMAX = 300	
IMAX = 1	
VMAX = 12	

### User Variables:

*Obr. 2.3: Prvek VARIABLES z knihovny pspice\_elem.*

Pasivní prvky z knihovny pspice\_elem mají navíc pro toleranční analýzu parametr TOL\_ON\_OFF, který umožňuje vypnout toleranci, ta pak není použita při simulaci

## 2.2. Základní pojmy statistiky a pravděpodobnosti

Statistická a toleranční analýza vychází z teorie statistiky a pravděpodobnosti. Znalost této teorie je nezbytná pro korektní nastavení analýz a správnou interpretaci zobrazených výsledků. Statistických termínů se používá pro popis vlastností hromadně vyráběných součástek a také pro posouzení vlastností obvodů z nich sestavených.

### Základní pojmy [6]

Náhodný jev – Výsledek děje podléhajícího vlivu náhody – náhodného pokusu. Výsledek nelze předem určit, proto není náhodným jevem jev nemožný ani jev jistý. Pokud je výsledkem náhodného pokusu



reálné číslo, pak se označuje jako náhodná veličina. Náhodnou veličinou je například výstup generátoru náhodných čísel používaný při analýze Monte Carlo.

Pravděpodobnost – Vlastnost náhodného, jistého a nemožného jevu. Pravděpodobnost definuje rovnice 1 (Laplaceova definice pravděpodobnosti).

$$P(J) = \frac{n_p}{n_c} \quad (1)$$

Kde  $P(J)$  je pravděpodobnost náhodného jevu  $J$ ,  $n_p$  je počet příznivých výsledků a  $n_c$  je celkový počet všech možných výsledků náhodného jevu  $J$ . Platí  $P(J) \in \langle 0; 1 \rangle$ . Pravděpodobnost jistého jevu je 1, pravděpodobnost jevu nemožného je 0. Tato jednoduchá definice pravděpodobnosti je pro následující text dostačující.

Medián – Prostřední hodnota ze seřazeného statistického souboru. Pokud statistický soubor obsahuje lichý počet hodnot, pak je medián prostřední hodnota. Při sudém počtu hodnot je medián dán aritmetickým průměrem dvou prostředních hodnot.

Histogram – Grafické znázornění intervalů rozdělení četností. Slouží k zřehlednění statistických dat. Histogram vznikne rozdělením proměnné veličiny do intervalů, které pokrývají celý rozsah možných hodnot. Pro jednotlivé intervaly je následně stanovena četnost výskytu hodnot z daného intervalu. Počet intervalů je vhodné zvolit podle Sturgesova pravidla (rovnice 2).

$$i \approx 1 + 3,3 \cdot \log(k) \quad (2)$$

Kde  $i$  je počet sloupců a  $k$  je rozsah souboru.

Distribuční funkce (CDF) – Slouží k popisu náhodné veličiny. Jedná se o zobrazení přiřazující hodnotám daného intervalu pravděpodobnost, s jakou náhodná veličina splní nerovnost, že náhodná veličina  $X$  bude menší, nebo rovna hodnotě  $x$ .

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (3)$$

Pokud bude uvažována spojitá náhodná veličina  $X$ , pak pravděpodobnost, že  $X \in \langle a; b \rangle$  je:

$$P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a) \quad (4)$$

Funkce rozložení hustoty pravděpodobnosti (PDF) – Funkce udávající pravděpodobnost, že náhodná veličina  $X$  bude mít danou hodnotu. PDF lze získat pro spojitě náhodné veličiny derivací CDF nebo odhadem z histogramu.

$$f(x) = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \quad (5)$$

Pro distribuční funkci platí normovací podmínka:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1 \quad (6)$$

Pokud bude uvažována spojitá náhodná veličina  $X$ , pak pravděpodobnost, že  $X \in \langle a; b \rangle$  je dána vztahem 7.

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (7)$$

Ze vztahu 7 také plyne že pravděpodobnost  $P(X = n) = \int_n^n f(x)dx = 0$ ; ( $n \in \mathbb{R}$ ).

Střední hodnota je definována vztahem 8.

$$\mu(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x)dx \quad (8)$$

Korelace – Formální označení souvislosti mezi změnami dvou náhodných veličin. Pojem korelační koeficient představuje míru korelace. V SPICE modelech pro simulátor se korelované tolerance zapisují parametrem lot.

Rozptyl – Veličina popisující variabilitu rozdělení pravděpodobnosti.

$$\sigma_x^2(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu(X))^2 \cdot f(x)dx \quad (9)$$

Kde  $\sigma_x$  je směrodatná odchylka.

Variační rozpětí – Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou číselné proměnné. Odpovídá šířce tolerančního pásma. [6]

Základní rozdělení dostupná v OrCADu jsou uniformní a Gaussovo.

### **Gaussovo rozdělení**

Funkce hustoty rozložení pravděpodobnosti Gaussova rozdělení je dána vztahem 10. Gaussovo rozdělení je významné vzhledem k jeho podobnosti s obvyklými náhodnými jevy. Proto se také označuje jako normální rozdělení. Tomuto rozdělení odpovídají například hodnoty odporů u běžně vyráběných rezistorů. [7]

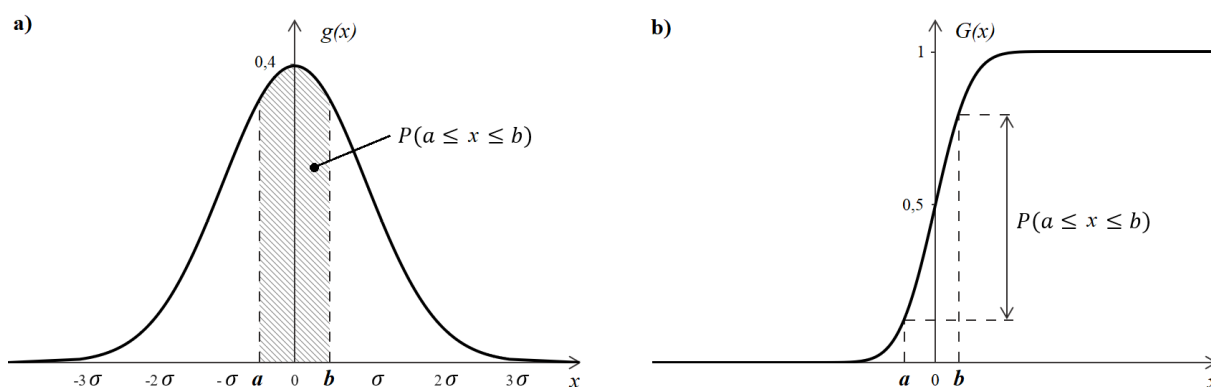
$$g_{\sigma\mu}(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

Normované Gaussovo rozdělení ( $\mu = 0, \sigma = 1$ ):

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (11)$$

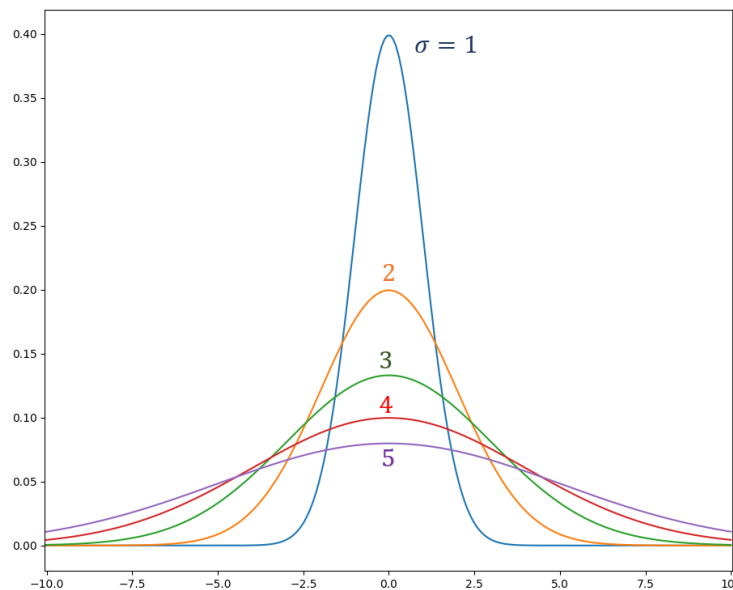
Distribuční funkce Gaussova rozdělení:

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (12)$$



Obr. 2.4: Průběh a) PDF a b) CDF pro Gaussovo rozdělení.

Na obrázku 2.4 se nachází a) průběh funkce rozložení hustoty pravděpodobnosti a b) distribuční funkce Gaussova normálního rozdělení. U průběhu jsou také graficky znázorněny vztahy 4 a 7. U funkce PDF jsou na vodorovné ose vyznačeny násobky směrodatné odchylky. V rozmezí  $-\sigma$  až  $\sigma$  se proměnná nachází s 68,27 % pravděpodobností. Pro interval od  $-2\sigma$  do  $2\sigma$  je to 95,45 %. Pokud je směrodatná odchylka v rozmezí od  $-3\sigma$  do  $3\sigma$ , potom je pravděpodobnost 99,73 %. Při nastavení distribuce tolerance parametru na GAUSS je použit toleranční interval  $3\sigma$  (u jiných distribucí je to  $\sigma$ ). Výrobní tolerance součástek jsou obvykle udávány právě s pravděpodobností 99,73 %, z čehož plyne že skutečná hodnota se může nacházet i mimo toleranční pásmo. [8] Hodnota směrodatné odchylky se nastavuje při volbě distribuce GaussUser v nastavení analýzy Monte Carlo. Vliv změny směrodatné odchylky je na obrázku 2.5.



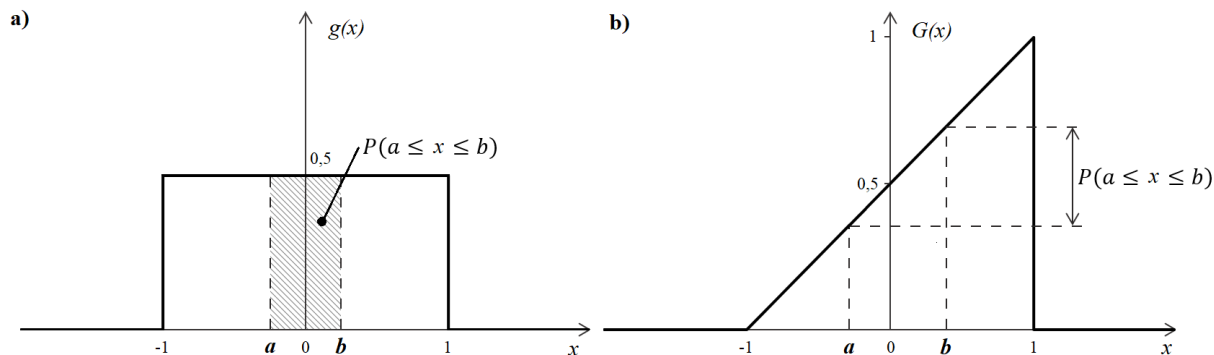
Obr. 2.5: Hustota pravděpodobnosti Gaussova rozdělení pro různé hodnoty směrodatné odchylky.

### Uniformní rozdělení

Funkce hustoty rozložení pravděpodobnosti je pro uniformní rozdělení konstantní. Tato funkce má tak na intervalu  $\langle x_1; x_2 \rangle$  konstantní nenulovou hodnotu a mimo tento interval hodnotu nulovou. Vzhledem k platnosti normovací podmínky je hodnota funkce PDF na intervalu  $\langle x_1; x_2 \rangle$  rovna  $\frac{1}{x_2 - x_1}$  předpis je tedy dán vztahem 13. Vztah 14 je předpisem pro CDF.

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{x_2 - x_1}, & x \in \langle x_1; x_2 \rangle \\ 0, & x \notin \langle x_1; x_2 \rangle \end{cases} \quad (13)$$

$$G(x) = \begin{cases} 0, & x \in (-\infty; x_1) \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & x \in \langle x_1; x_2 \rangle \\ 1, & x \in \langle x_2; \infty \rangle \end{cases} \quad (14)$$



Obr. 2.6: Průběh a) PDF a b) CDF pro Uniformní rozdělení.

Na obrázku 2.6 je a) funkce rozložení hustoty pravděpodobnosti a b) distribuční funkce pro rovnoměrné rozdělení. V průbězích jsou opět graficky znázorněny vztahy 4 a 7.

Uniformní rozdělení odpovídá nastavení tolerance na hodnotu FLAT. Jeho vhodné využití je při analýze Monte Carlo, kde je cílem pokrýt co nejširší rozpětí kombinací hodnot.

Hromadná výroba rezistorů a kondenzátorů se provádí ve standardních modelových řadách. Preferované hodnoty kapacity kondenzátorů a odporu rezistorů jsou definovány podle normy ČSN EN 60063 v tzv. řadách E. Norma také udává tolerance pro jednotlivé řady.

Tab. 2: Tolerance odporových řad.

Označení	E3	E6	E12	E24	E48	E96	E192
Tolerance	$> \pm 20 \%$	$\pm 20 \%$	$\pm 10 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 2 \%$	$\pm 1 \%$	$< \pm 1 \%$

Tolerance udané v tabulce 2 jsou platné pro rezistory. Pro kapacitory se obvykle řady vyšší, než E48 nepoužívají a nejnižší tolerance  $\pm 1 \%$  se používá u řady E24.

### 3 Statistická a toleranční analýza

Simulace elektrického obvodu spočívá v sestavení a řešení obvodových rovnic, které jsou vyjádřením matematického modelu idealizované fyzikální soustavy. Výsledné hodnoty po provedení simulace odpovídají ideálnímu stavu, ve kterém mají obvodové prvky své jmenovité hodnoty. Simulační program tak poskytne výsledky, které nemusí souhlasit s hodnotami veličin u realizace. Rozdílné vlastnosti idealizovaného obvodu a skutečného zapojení vznikají v důsledku rozdílných parametrů součástek použitých v zapojení. Typickým příkladem variability parametrů jsou součástky s určitou výrobní tolerancí. Další příčiny neshody parametrů zahrnují stárnutím materiálů, vliv teploty nebo radiace. V úvahu také přichází vliv parazitních vlastností.

Pro stanovení spolehlivosti hromadně vyráběných produktů se obecně využívá principů statistiky a pravděpodobnosti. Sledovaná vlastnost, podle které se hodnotí spolehlivost je například šířka pásma, zkreslení, vstupní nebo výstupní impedance a podobně. V této práci je taková veličina označována jako sledovaná veličina nebo jako sledovaná charakteristika.

Simulace zahrnující různé faktory se provádí pomocí toleranční, citlivostní a statistické analýzy. Jedná se o analýzy, které využívají statistických a pravděpodobnostních postupů k dosažení optimalizace vlastností obvodů a k optimalizaci hromadné výroby. Tyto analýzy umožňují odhalit možné špatné fungování obvodu již během návrhu, a tak mohou vést ke snížení výrobních nákladů a zefektivnění vývoje. [1]

#### 3.1 Toleranční analýza [8], [9]

Toleranční analýza je proces, při kterém se na základě známých odchylek parametrů prvků určuje odchylka sledované charakteristické vlastnosti. Obráceně toleranční syntéza je úloha spočívající v nalezení takových hodnot tolerancí prvků, při kterých nedojde k překročení maximální povolené odchylky sledované charakteristiky. [4]

Přesné provedení toleranční analýzy je proveditelné jen pro jednoduché obvody. V případě obvodů se složitou topologií a větším množstvím použitých součástek lze použít jeden z následujících nástrojů:

- Citlivostní analýza
- Analýza Monte Carlo
- Analýza nejhoršího případu

Každý z uvedených nástrojů představuje analýzu dostupnou v prostředí OrCAD. Jednotlivé analýzy mají své specifické vlastnosti, ze kterých plynou určitá omezení a nepřesnosti. Každá z uvedených analýz pracuje s měřicí funkcí (Measurement Expression). Místem pro zadání měřicí funkce je editor Probe, nebo modul rozšířených analýz. Rozšířené analýzy jde provádět přímo v programu PSpice AD nebo v modulu rozšířených analýz PSpice AA. O vytvoření měřicích funkcí jsou dostupné informace v [4] a [10]. Vlastnostem a možnostem provedení daných analýz se zabývá následující text.

Obvyklým cílem metod toleranční analýzy je stanovit oblast, ve které se může sledovaná charakteristika nacházet.

Vstupní parametr je hodnota libovolné veličiny, na které závisí výstupní veličina. Například u pasivního filtru jsou vstupními parametry hodnoty použitých pasivních součástek a výstupní veličina je amplitudová frekvenční charakteristika.

Výtěžnost výroby  $Y$  je definována jako poměr počtu analyzovaných obvodů splňujících požadavky  $m$  a celkového počtu analyzovaných obvodů  $M$ .

$$Y = \frac{m}{M} \cdot 100 \% \quad (15)$$

Při hromadné výrobě může dojít k situaci, kdy část z vyráběných zařízení nesplňuje zadané požadavky. V tomto případě je výtěžnost výroby nižší, než 100 %. Náklady na hromadnou výrobu jsou nepřímo úměrné výtěžnosti, proto je kladen důraz na dosažení co nejvyšší výtěžnosti. Například, pokud 100 realizací z 1 000 000 nesplňuje specifikace, pak je výtěžnost 99,99 %. Ceny použitých komponentů zpravidla s jejich rostoucí tolerancí klesají. Protichůdné požadavky na minimální cenu komponent a maximální výtěžnost dohromady vytvářejí optimalizační problém, kterým se zabývá tzv. toleranční design.

Jedním ze způsobů řešení je hledání optimální jmenovité hodnoty pro prvky s vysokou citlivostí. [9]

Cenová funkce:

$$C = \frac{1}{Y} \left( b + \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\delta_{x_i}} \right) \quad (16)$$

Kde:

$C$  ... Cena realizace splňující požadavky.

$Y$  ... Výtěžnost výroby.

$\delta_x$  ... Tolerance parametru.

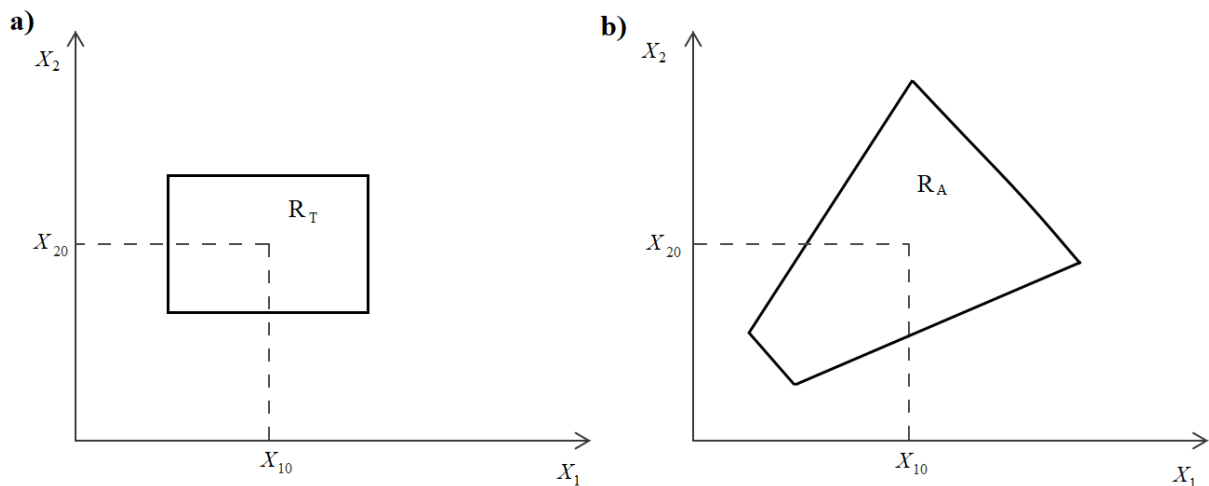
$a, b$  ... Konstanty.

Oblast tolerancí je obecně  $n$ -rozměrný kvádr v  $n$ -rozměrném prostoru parametrů, kde  $n$  je počet vstupních parametrů. Oblast tolerancí se značí  $R_T$  (tolerance region). Střed oblasti tolerancí odpovídá jmenovitým hodnotám parametrů a rozměry jsou dány hodnotami tolerancí. Pro jeden parametr je oblast tolerancí úsečka a pro dva parametry obdélník. Každá realizace obvodu představuje bod v oblasti tolerancí.

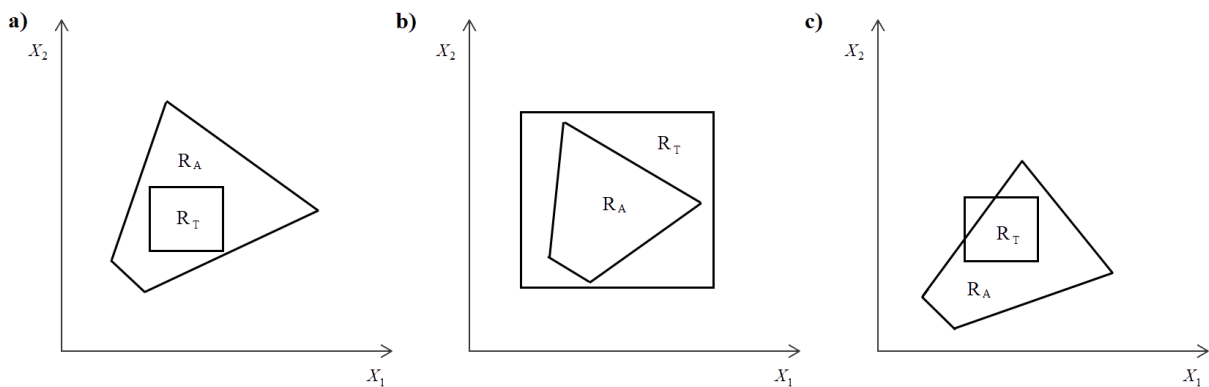
Oblast přijatelnosti je zobrazením dovolené oblasti výstupních charakteristik (například tolerančních schémat) do prostoru parametrů. Značí se  $R_A$  (region of acceptability).

Cílem tolerančního designu je umístit oblast  $R_T$  do oblasti  $R_A$ .

Příklad oblasti tolerancí  $R_T$  pro dva parametry a oblasti přijatelnosti  $R_A$  je na obrázku 3.1. Na obrázku 3.2 jsou možnosti vzájemné polohy obou oblastí. Podle vzájemné polohy oblasti  $R_T$  a  $R_A$  lze stanovit výtěžnost výroby (manufacturing yield). Vzhledem k náhodnému charakteru rozptylu hodnot parametrů lze výtěžnost pouze odhadovat.



Obr. 3.1: Znáznornění a) prostoru tolerancí b) oblasti přijatelnosti.



Obr. 3.2: Možné polohy prostoru tolerancí a přijatelnosti.

Na obrázku 3.2 jsou naznačeny tři možnosti vzájemné polohy:

- a) Oblast tolerancí je uvnitř oblasti přijatelnosti, což znamená 100 % výtěžnost výroby.
- b) Oblast přijatelnosti je uvnitř oblasti tolerancí, výtěžnost výroby je menší, než 100 %.
- c) Oblasti se částečně překrývají, výtěžnost výroby je menší, než 100 %.

Zvýšení výtěžnosti výroby lze dosáhnout několika způsoby:

1. Změnou jmenovitých hodnot parametrů při konstantních tolerancích (design centering). Tímto postupem se posune oblast  $R_T$ .
2. Změnou hodnot tolerancí – snížením, nebo zvýšením. V tomto případě se hledá optimum, kdy snížení tolerancí zvýší cenu realizace, ale zároveň zvýší výtěžnost výroby. V případě, kdy je  $R_T$  zcela uvnitř  $R_A$  lze zvýšením tolerancí dosáhnout snížení ceny bez vlivu na výtěžnost výroby.
3. Změnou topologie.
4. Vhodnou úprava požadavků – tolerančních schémat.



Zvětšení průniku oblasti  $R_T$  a  $R_A$  zvýší výtěžnost pro uniformní distribuce, pro jiné, než uniformní to tak být nemusí. [9]

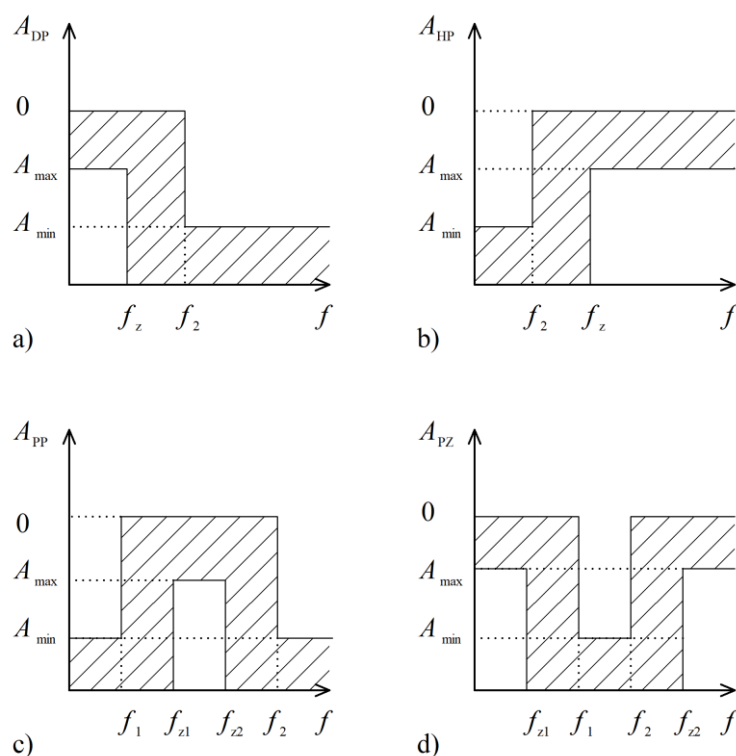
Běžným použitím tolerančního designu je návrh analogových filtrů jejichž vlastnosti jsou silně ovlivňovány hodnotami použitých součástek.

### Analogové filtry

Výše popsané postupy lze využít k návrhu analogových filtrů. Přenosové vlastnosti filtrů jsou určeny topologií a hodnotami použitých součástek. Zesílení nebo útlum filtru v závislosti na frekvenci udává amplitudová charakteristika. Podle tvaru amplitudové charakteristiky lze rozlišit čtyři základní druhy filtrů: dolní propust, horní propust, pásmovou propust a pásmovou zádrž.

Při návrhu je mimo jiné důležité, aby kmitočtová charakteristika ležela v požadovaných mezích. Grafickým znázorněním těchto mezí vznikne toleranční schéma – obrázek 3.3. Vyšrafovaná plocha v tolerančním schématu určuje oblast, ve které se musí charakteristika nacházet.

Analogové filtry obsahující aktivní prvek se označují jako aktivní filtry. Filtry složené pouze z pasivních prvků se označují jako pasivní. Při volbě typu filtru je třeba vycházet z výše uvedených požadavků. Pasivní filtry jsou vhodné pro vyšší kmitočty řádově do 200 MHz. Pro nižší kmitočty (do desítek kHz) vycházejí při návrhu vysoké hodnoty indukčnosti, které jsou problematické z hlediska realizace. Aktivní filtry lze realizovat bez těchto indukčností, proto jsou vhodné k aplikacím, kde pracují při kmitočtu v řádu desítek kHz. [5]



Obr. 3.3: Toleranční schéma kmitočtových filtrů: a) dolní propust, b) horní propust, c) pásmová propust, d) pásmová zádrž. [5]

Na obrázku 3.3 jsou vyznačeny tyto meze

$A_{MAX}$  – maximální přípustný útlum v propustném pásmu

$A_{MIN}$  – minimální útlum v nepropustném pásmu

$f_z$  – zlomový kmitočet, na kterém je útlum  $A_{MAX}$

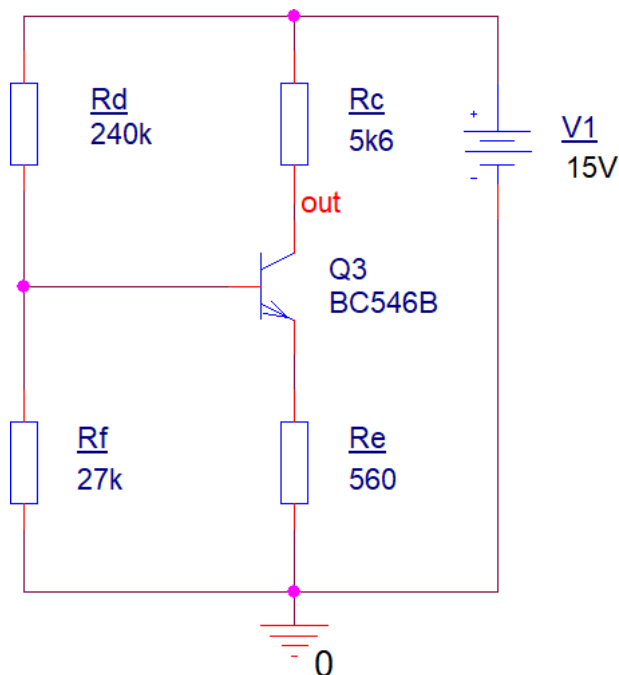
$f_1$  a  $f_2$  – kmitočty v zádržném pásmu, které mají útlum minimálně  $A_{MIN}$

## 3.2 Citlivostní analýza (Sensitivity Analysis)

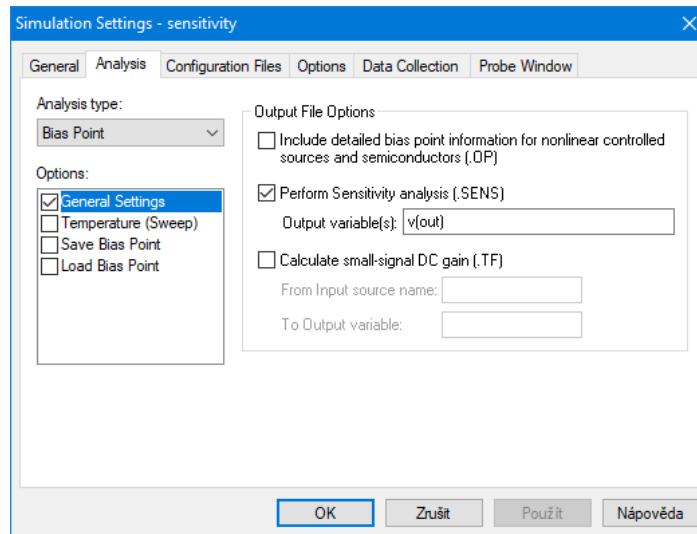
Citlivostní analýza vychází z předpokladu, že změna sledované charakteristiky obvodu závisí na změně obvodového parametru. Závislost je dle předpokladů lineární, nebo slabě nelineární. Citlivost obvodu na daný parametr je definována jako poměr změny sledované veličiny ke změně hodnoty parametru. Základní citlivostní analýzu lze provést v programu PSpice při analýze stejnosměrného pracovního bodu. Při této analýze se stanoví citlivost pracovního bodu na všechny obvodové parametry (Tím jsou myšleny hodnoty součástek – odpor, kapacita, indukčnost a parametry modelů.). Citlivostní analýza se také používá při analýze nejhoršího případu (Worst-case). Při nastavení se zadává jedna, nebo více sledovaných veličin (napětí nebo proudů) oddělených čárkou, viz obrázek 3.5. Zadaný proud musí téct přes nezávislý napěťový zdroj, například v zapojení na obrázku 3.4 je možné zjistit pouze citlivost proudu zdrojem V1. [10]

### 1. příklad – citlivost stejnosměrného pracovního bodu

Následující zapojení obsahuje rezistory z řady E24, které nemají nastavenou toleranci – pro následující simulace není potřebná.



Obr. 3.4: Schéma ke stanovení citlivosti stejnosměrného pracovního bodu.



Obr. 3.5: Citlivost stejnosměrného pracovního bodu – nastavení simulačního profilu.

Výsledky analýzy, zadané na obrázku 3.5 jsou zapsány formou textové tabulky ve výstupním souboru. V tabulce jsou zapsány jmenovité hodnoty parametrů, absolutní (sloupec ELEMENT SENSITIVITY) a relativní (sloupec NORMALIZED SENSITIVITY) citlivosti napětí v zadaném uzlu na hodnoty rezistorů, napájecích napětí a parametrů tranzistoru.

Tab. 2: Výsledky citlivostní analýzy stejnosměrného pracovního bodu.

#### DC SENSITIVITIES OF OUTPUT V(OUT)

	ELEMENT NAME	ELEMENT VALUE	ELEMENT SENSITIVITY (VOLTS/ UNIT)	NORMALIZED SENSITIVITY (VOLTS/PERCENT)
Q_Q3	R_Rd	2.400E+05	4.828E-05	1.159E-01
	R_Rf	2.700E+04	-3.973E-04	-1.073E-01
	R_Rc	5.600E+03	-1.307E-03	-7.321E-02
	R_Re	5.600E+02	1.125E-02	6.300E-02
	V_V1	1.500E+01	1.320E-01	1.981E-02
	RB	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	RC	9.747E-01	2.004E-05	1.953E-07
	...			

Absolutní citlivost vyjadřuje poměr o kolik jednotek se změní výstupní veličina ku změně hodnoty daného parametru o jednu jednotku. Relativní citlivost vyjadřuje poměrnou změnu výstupní veličiny při zvýšení hodnoty parametru o jedno procento. Hodnota relativní citlivosti vypočtená v OrCADu je stanovena jako tzv. semirelativní citlivost, která udává absolutní změnu sledované veličiny při změně hodnoty parametru o 1 %.

Výpočet absolutní citlivosti [10]:

$$S_{\text{abs}} = \frac{M_s - M_n}{P_n \cdot S_v \cdot Tol} \quad (17)$$

Kde:

$M_s$  ... hodnota měřicí funkce ze simulace s hodnotou parametru danou vztahem 19

$M_n$  ... hodnota měřicí funkce ze simulace se jmenovitými hodnotami

$Tol$  ... relativní tolerance parametru

$P_n$  ... jmenovitá hodnota parametru

$S_v$  ... součinitel tolerance (Sensitivity Variation)

Výpočet semirelativní citlivosti: [10]

$$S_{\text{rel}} = \frac{M_s - M_n}{S_v \cdot Tol} \cdot 1 \% \quad (18)$$

Kde:

$M_s$  ... hodnota měřicí funkce ze simulace s hodnotou parametru danou vztahem 19

$M_n$  ... hodnota měřicí funkce ze simulace se jmenovitými hodnotami

$Tol$  ... relativní tolerance parametru

$S_v$  ... součinitel tolerance (Sensitivity Variation)

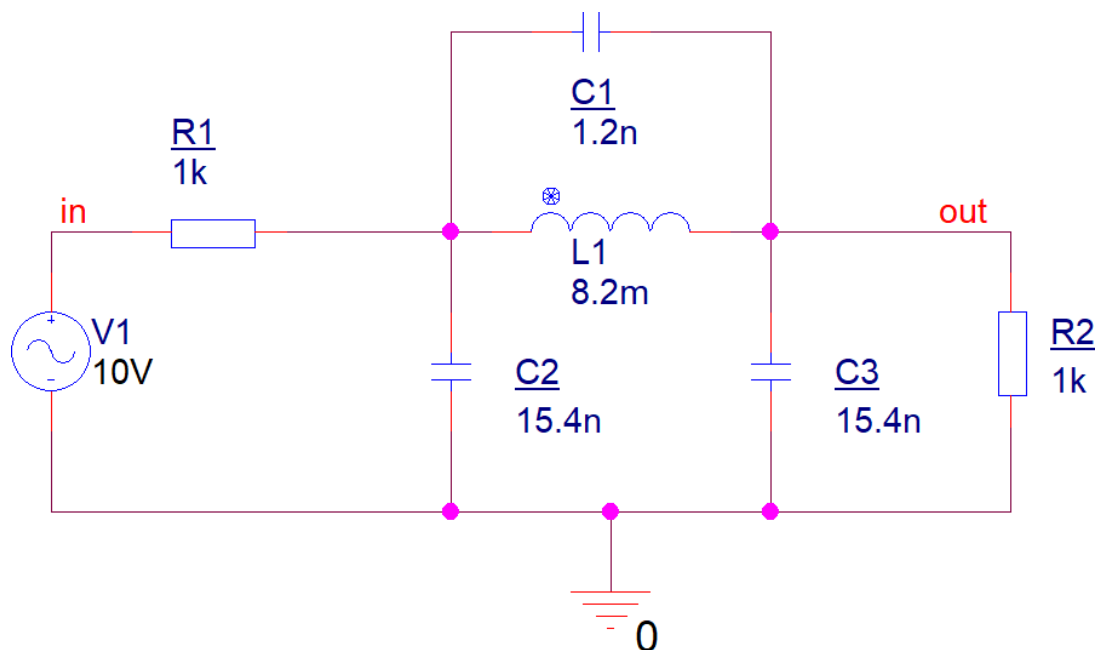
Použití citlivostní analýzy v kombinaci s časovou, stejnosměrnou nebo střídavou analýzou je možné nastavením volby *Worst-case/Sensitivity* v nabídce pod volbou *Monte Carlo/Worst Case*, viz obrázek 3.11.

Více možností umožňuje citlivostní analýza, která je součástí modulu rozšířených analýz. V tomto modulu lze počítat citlivost libovolné měřicí funkce na změny parametrů. Citlivostní analýzu jde provést v kombinaci s časovou, stejnosměrnou, nebo střídavou analýzou.

Provedení citlivostní analýzy z modulu rozšířených analýz demonstruje následující příklad. Cílem je určit citlivost mezní frekvence analogového filtru na parametry použitých součástek. Filtr je Cauerova dolní propust 3. řádu.

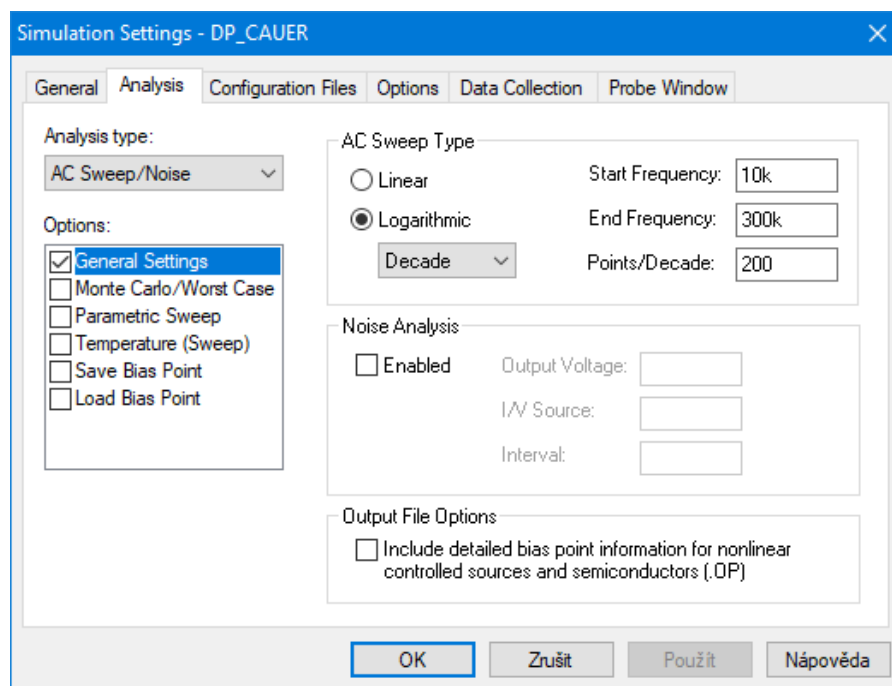
Prvním krokem je sestavit schéma včetně nastavení tolerancí – obrázek 3.6. Tolerance je u všech pasivních prvků nastaveny na 1 %.

## 2. příklad – citlivost mezní frekvence pasivního filtru



Obr. 3.6: Schéma pasivního filtru 5. řádu k určení citlivosti s modulem rozšířených analýz.

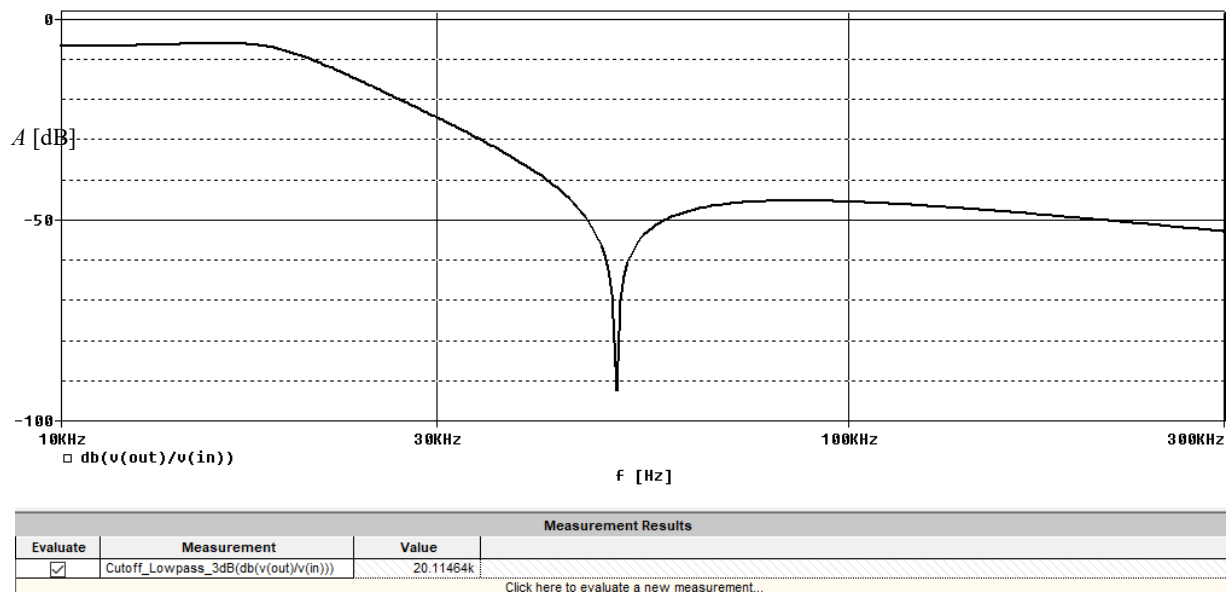
Následně se provede nastavení základní analýzy, v tomto případě střídavé analýzy.



Obr. 3.7: Nastavení střídavé analýzy.

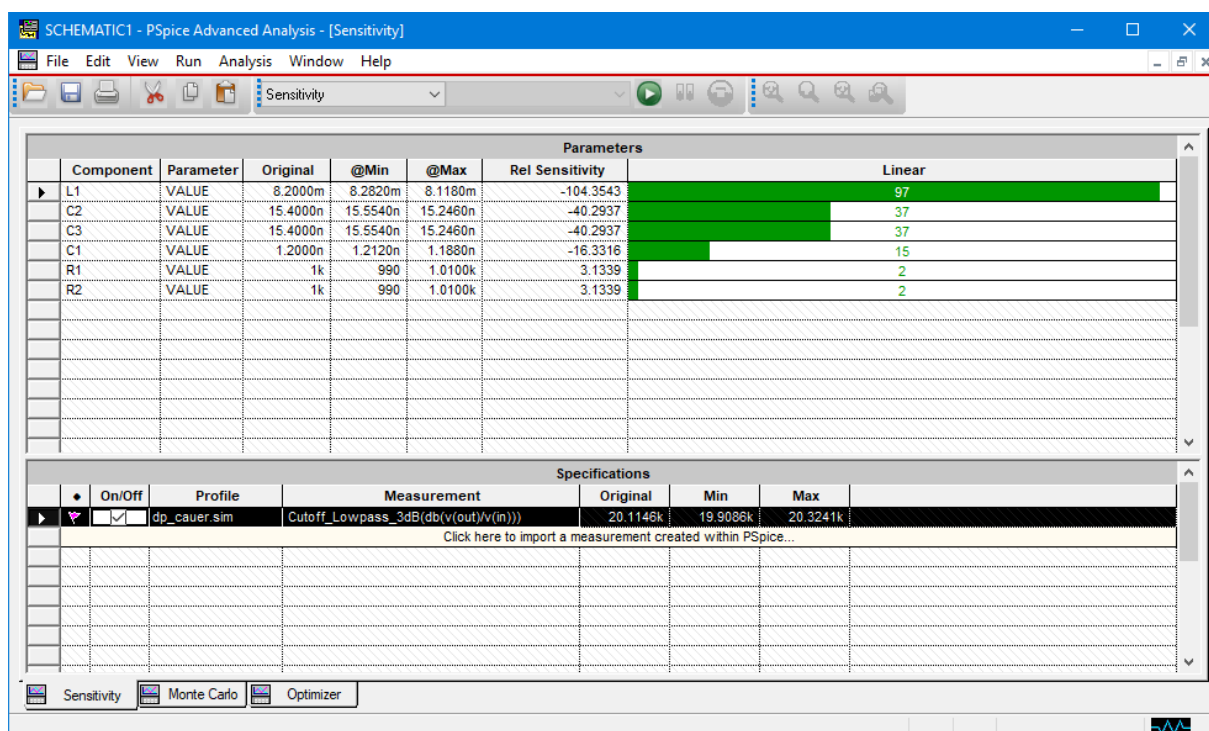
K provedené základní analýze se v Editoru Probe nastaví měřicí funkce pro pokles o 3 dB:

Cutoff\_Lowpass\_3dB(v(out)/v(in))



Obr. 3.8: Výsledek střídavé analýzy Cauerova filtru.

Následně se otevře modul rozšířených analýz. Ve střední části okna se importuje měřicí funkce a tlačítkem *Start* se spustí citlivostní analýza.



Obr. 3.9: Výsledky citlivostní analýzy v modulu rozšířených analýz.

Na obrázku 3.9 jsou výsledky citlivostní analýzy v modulu PSpice AA. V tabulce označené *Parameters* jsou vypsané parametry obvodu sestupně podle míry vlivu na sledovanou měřicí funkci. Sloupce *Original* obsahuje jmenovité hodnoty parametrů. Ve sloupcích *@Min* a *@Max* jsou hodnoty použité pro

výpočet nejhoršího případu, pro které má měřicí funkce minimální a maximální hodnotu. Sloupec *Rel Sensitivity* obsahuje hodnoty semirelativní citlivosti (případně absolutní).

Sloupec nadepsaný *Linear* obsahuje hodnoty relativních citlivostí. Změny hodnoty indukčnosti L1 a kapacity C2 mají tedy největší vliv na mezní frekvenci, naopak nejmenší vliv má hodnota odporu R2.

Kliknutí RMB na řádek v tabulce *Parameters* otevře nabídku, která obsahuje možnost najít daný prvek ve schématu, přepínat mezi zobrazením absolutní a semirelativní citlivosti a měnit mezi lineárním a logaritmickým zobrazením výsledků.

V druhé zobrazené tabulce jsou vypsány použité měřicí funkce. V tomto případě pouze Cutoff\_Lowpass\_3dB(v(out)/v(in)). V této tabulce je ve sloupci *Original* uvedena hodnota dané měřicí funkce vypočtená z výsledků simulace se jmenovitými hodnotami parametrů součástek. Dále jsou ve sloupcích *Min* a *Max* uvedeny minimální a maximální hodnoty kterých měřicí funkce při některé ze simulací dosáhla (nejhorší případ).

Nastavení simulačního profilu rozšířené analýzy obsahuje v případě citlivostní analýzy pouze položku *Sensitivity Variation* -  $S_v$ . Ve výchozím nastavení je 40 %. Nižší hodnota této položky implikuje nižší diferencí při numerickém výpočtu derivace. Způsob výpočtu citlivosti jakožto podílu diferencí předpokládá, že hodnota měřicí funkce závisí lineárně na uvažovaném parametru. Z toho také plyne omezení přesnosti výpočtu.

Výsledná citlivost je vypočtená podle vzorce 17 a 18. Pro výpočet proběhne v tomto případě celkem 9 simulací. První proběhne s jmenovitými hodnotami parametrů. Následně proběhne simulace pro každý parametr s nastavenou tolerancí. Hodnota parametru se určí z jeho jmenovité hodnoty, tolerance a hodnoty  $S_v$  podle vztahu 19.

$$H_n = H_n + (H_n \cdot S_v \cdot Tol) \quad (19)$$

Kde:

$H_n$  ... hodnota n-tého parametru

$S_v$  ... součinitel tolerance

$Tol$  ... tolerance

Poslední simulace proběhne pro minimální hodnoty z tolerančního intervalu.

Například pro kapacitor C2, který má toleranci 1 % a jmenovitou hodnotu 15,4 nF budou v dílčích simulacích použity následující hodnoty kapacity ( $S_v$  má výchozí hodnotu 40 %):

1. jmenovitá hodnota 15,4 nF

2. hodnota  $H_n = H_n + (H_n \cdot S_v \cdot Tol) = 15,4 + (15,4 \cdot 0,4 \cdot 0,01) \text{ nF} = 15,4616 \text{ nF}$

3. maximální hodnota  $H_n = H_n + H_n \cdot Tol = 15,4 + 15,4 \cdot 0,01 \text{ nF} = 15,554 \text{ nF}$

4. minimální hodnota  $H_n = H_n - H_n \cdot Tol = 15,4 - 15,4 \cdot 0,01 \text{ nF} = 15,246 \text{ nF}$

Semirelativní citlivost se pro kapacitor C2 spočítá podle vztahu 18.

$$S_{rel} = \frac{M_s - M_n}{S_v \cdot Tol} = \frac{20098,53 - 20114,64}{0,4 \cdot 0,01} \cdot 0,01 = -40,29 \text{ Hz/\%}$$

Záporný výsledek znamená, že při zvýšení hodnoty kapacity o 1 % se mezní frekvence sníží o 40,29 Hz.

Analogicky se vypočte absolutní citlivost:

$$S_{abs} = \frac{M_s - M_n}{P_n \cdot S_v \cdot Tol} = \frac{20098,53 - 20114,64}{15,4 \cdot 10^{-9} \cdot 0,4 \cdot 0,01} = -261,65 \cdot 10^9 \text{ Hz/F}$$

Hodnoty parametrů a výsledné hodnoty sledované veličiny pro danou simulaci jsou ve výstupním souboru (View > Log File > Sensivity).

Podle výsledků citlivostní analýzy je možno stanovit, které komponenty mají větší význam například pro optimalizaci. Na základě výsledků lze také stanovit tolerance daných komponentů nebo provést potřebné úpravy topologie obvodu tak, aby při použití již stanovených tolerancí sledovaná charakteristika ležela v přijatelném pásmu. Mezi úpravy topologie sloužící ke snížení citlivosti patří například u filtrů snížení řádu, změna typu (Čebyševův na Butterworthův), případně použití pasivního filtru namísto aktivního. [8]

### 3.3 Analýza nejhoršího případu (Worst-case)

Cílem analýzy je nalézt nejhorší možnou kombinaci parametrů. To je kombinace, při které nastane největší odchylka od hodnoty sledované veličiny. Worst-case analýza umožňuje do jisté míry stanovit chování obvodů v extrémních podmínkách a tím zvýšit bezpečnost a spolehlivost daného návrhu.

Při spuštění analýzy nejhoršího případu nejprve proběhne citlivostní analýza. Podle výsledků citlivostní analýzy se určí, která okrajová hodnota z tolerančního pásma bude použita pro určení nejhoršího případu. Nejhorší případ znamená maximální odchylku sledované veličiny při parametrech ležících na okrajích jejich tolerančních pásem. Z tohoto plyne omezení této analýzy. V potaz není brán vliv vzájemné provázanosti změn různých parametrů. Kombinace okrajových hodnot tak nezaručuje maximální odchylku sledované veličiny.

Analýza používající okrajových hodnot z tolerančních pásem se označuje jako Vertex analysis, neboli analýza vrcholů útvaru  $R_T$ . Náročnost této analýzy je tedy úměrná počtu vrcholů  $n$ -rozměrného kvádrů ( $2^n$ ). Z důvodu optimalizace se použije pouze okraj tolerančního pásma, který má větší vliv na sledovanou charakteristiku. Výhodou je, že není třeba znát průběh distribuční funkce, v potaz jsou brány pouze okrajové body. Analýzu je vhodné provést, když je požadavek na 100% výtěžnost výroby. [9]

Analýza nejhoršího případu je demonstrována na obvodu pro nastavení pracovního bodu bipolárního tranzistoru.

#### 3. příklad – analýza nejhoršího případu

Cílem je pro obvod z 1. příkladu zjistit největší možnou odchylku napětí a proudu rezistorem  $R_c$ . Pro tento účel bude použita stejnosměrná analýza, která umožňuje tento výpočet. Jako rozmítanou veličinu stejnosměrné analýzy jde použít libovolný vhodný parametr a zadat pro rozmítání pouze jednu hodnotu. Následně je nutné zadat tolerance všem parametrům, které se mají ve výpočtu zohlednit.



Pro demonstraci je zadána tolerance 20 % parametru tranzistoru  $Bf$ , který představuje proudový zesilovací činitel  $h_{21E}$ . Tolerance je zadána do modelu následovně:

...  $V_{af}=62.79$   **$Bf=374.6$**   **$DEV=20\%$**   $I_{se}=68f$   $N_e=1.576$  ...

Pro všechny rezistory je uvažována stejná tolerance 1 %, která je globálně zadána pomocí prvku VARIABLES z knihovny pspice\_elem. Rezistorům je do parametru TOLERANCE zadána hodnota RTOL (bez složených závorek a znaku procenta).

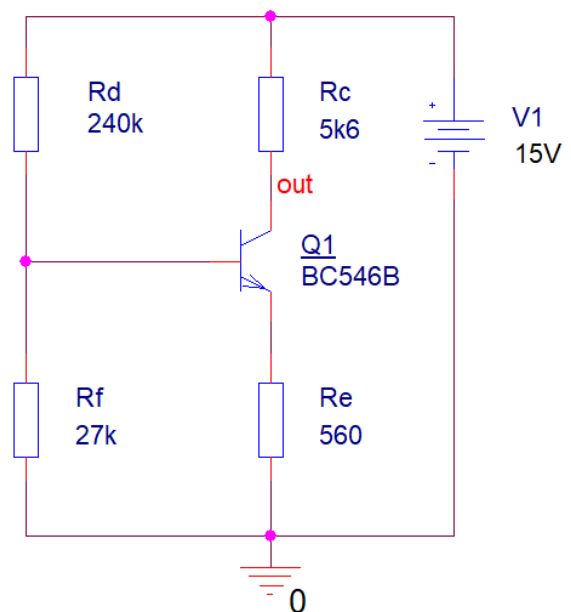
## Advanced Analysis Properties

### Tolerances:

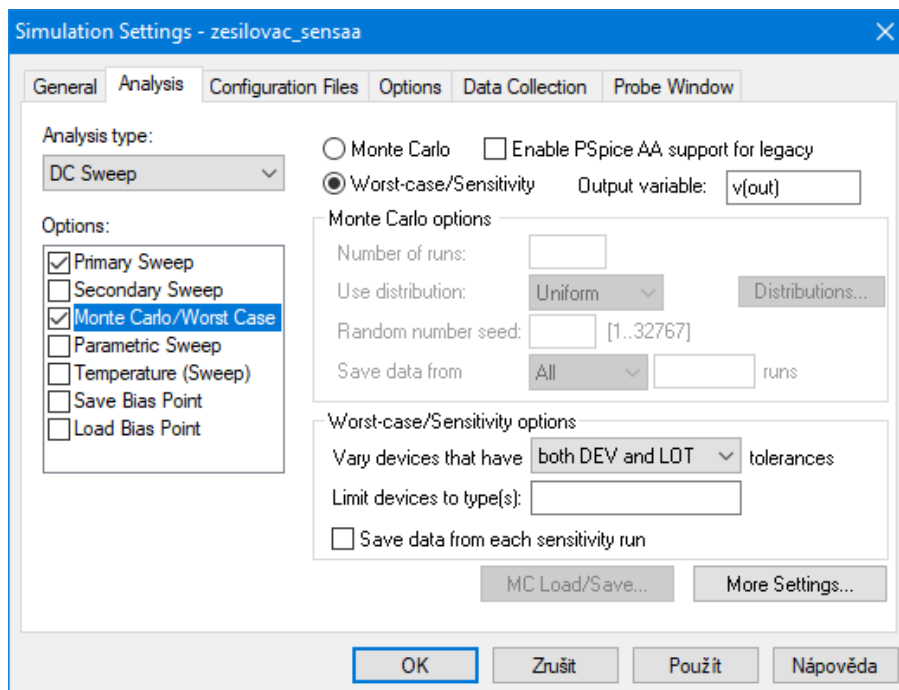
RTOL = 1%  
CTOL = 0  
LTOL = 0  
VTOL = 0  
ITOL = 0

### Smoke Limits:

RMAX = 0.25	ESR = 0.001
RSMAX = 0.0125	CPMAX = 0.1
RTMAX = 200	CVN = 10
RVMAX = 100	LPMAX = 0.25
CMAX = 50	DC = 0.1
CBMAX = 125	RTH = 1
CSMAX = 0.005	
CTMAX = 125	
CIMAX = 1	
LMAX = 5	
DSMAX = 300	
IMAX = 1	
VMAX = 12	



Obr. 3.10: Schéma s globálně zadanými tolerancemi pro 3. příklad.



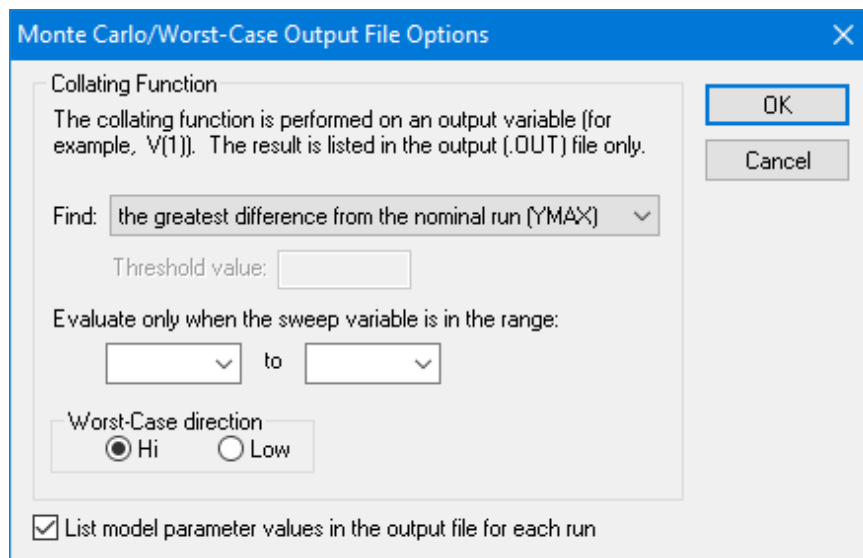
Obr. 3.11: nastavení simulačního profilu pro analýzu nejhoršího případu.

Volbou *Vary devices that have* na hodnotu *both DEV and LOT* je zadáno, že se použijí korelované i nekorelované tolerance. (Úskalí této volby je popsáno v 7. příkladu.) Pokud jsou při tomto nastavení zadány u tolerancí hodnoty DEV a LOT, pak se pro výpočet citlivostí použije pouze tolerance LOT. [10]

Nastavení hledané hodnoty se provede kliknutím na tlačítko *More Settings...* Tím se otevře nabídka, ve které se vybere, jaká hodnota se má hledat. Podle obrázku 3.12 je nastavena možnost *the greatest difference from the nominal run (YMAX)* – výstupní hodnotou bude hodnota, která se nejvíce liší od hodnoty při simulaci se jmenovitými hodnotami. Dále je nastavena možnost *Worst-Case direction* na hodnotu *Hi* – je hledán maximální kladný přírůstek.

Kromě největší odchylky obsahuje nabídka následující možnosti:

- the maximum value (MAX) – hledání maximální hodnoty
- the minimum value (MIN) – hledání minimální hodnoty
- the first rising threshold crossing (RISE\_EDGE) – hledání prvního překročení zadané hodnoty
- the first falling threshold crossing (FAL\_EDGE) – hledání prvního poklesu na zadanou hodnotu



Obr. 3.12: Nastavení hledané hodnoty pro analýzu nejhoršího případu.

Po dokončení analýzy jsou ve výstupním souboru nejprve vypsány největší odchylky od výchozí hodnoty, pokud se změní jeden z parametrů. Následně je uvedena tabulka pro nejhorší případ.

Tab. 3: Výsledky analýzy nejhoršího případu k příkladu 3.

#### WORST CASE ALL DEVICES

\*\*\*\*\*

Device	MODEL	PARAMETER	NEW VALUE	
Q_Q3	BC546B	BF	299.68	(Decreased)
R_Rd	R_Rd	R	1.01	(Increased)
R_Rf	R_Rf	R	.99	(Decreased)
R_Rc	R_Rc	R	.99	(Decreased)
R_Re	R_Re	R	1.01	(Increased)

Pod tabulkou je v souhrnu uvedena hledaná maximální odchylka v kladném smyslu:

#### WORST CASE ALL DEVICES

.5085 higher at V\_V1 = 15  
( 106.72% of Nominal)

Hodnota napětí na rezistoru Rc je pro jmenovité hodnoty 7,567 V, v nejhorším případě je 8,08, což je o 6,72 % vyšší.

Pro nalezení minimální hodnoty se v nastavení simulace změní hodnota *Worst-Case direction* na *Low*. V takovém případě je nalezená minimální hodnota 7,08 V, což je o 6,487 % méně.

Výpočet minimální i maximální hodnoty zároveň je možné provést v modulu rozšířených analýz. Pro tento účel je v tomto případě nutné vygenerovat kompatibilní netlist, aby se do výpočtu zahrnul parametr *Bf* zadaný neparametrizovanému modelu tranzistoru. Změna se provede v nastavení simulačního profilu analýzy *Monte Crlo / Worst Case* povolením možnosti *Enable PSpice AA support for legacy*. Následně se znovu vytvoří netlist (*PSpice > Create Netlist*).

[illegible]

Výsledky analýzy jsou na obrázku 3.13. V horní tabulce jsou parametry, které mají definovanou toleranci včetně parametru tranzistoru *Bf*. Spodní tabulka obsahuje výsledky měřicích funkcí. Ve sloupcích *Min* a *Max* jsou hledané minimální a maximální hodnoty napětí a proudu rezistorem *Rc*. Hodnoty napětí jsou shodné s předchozí analýzou provedenou pomocí PSpice AD.

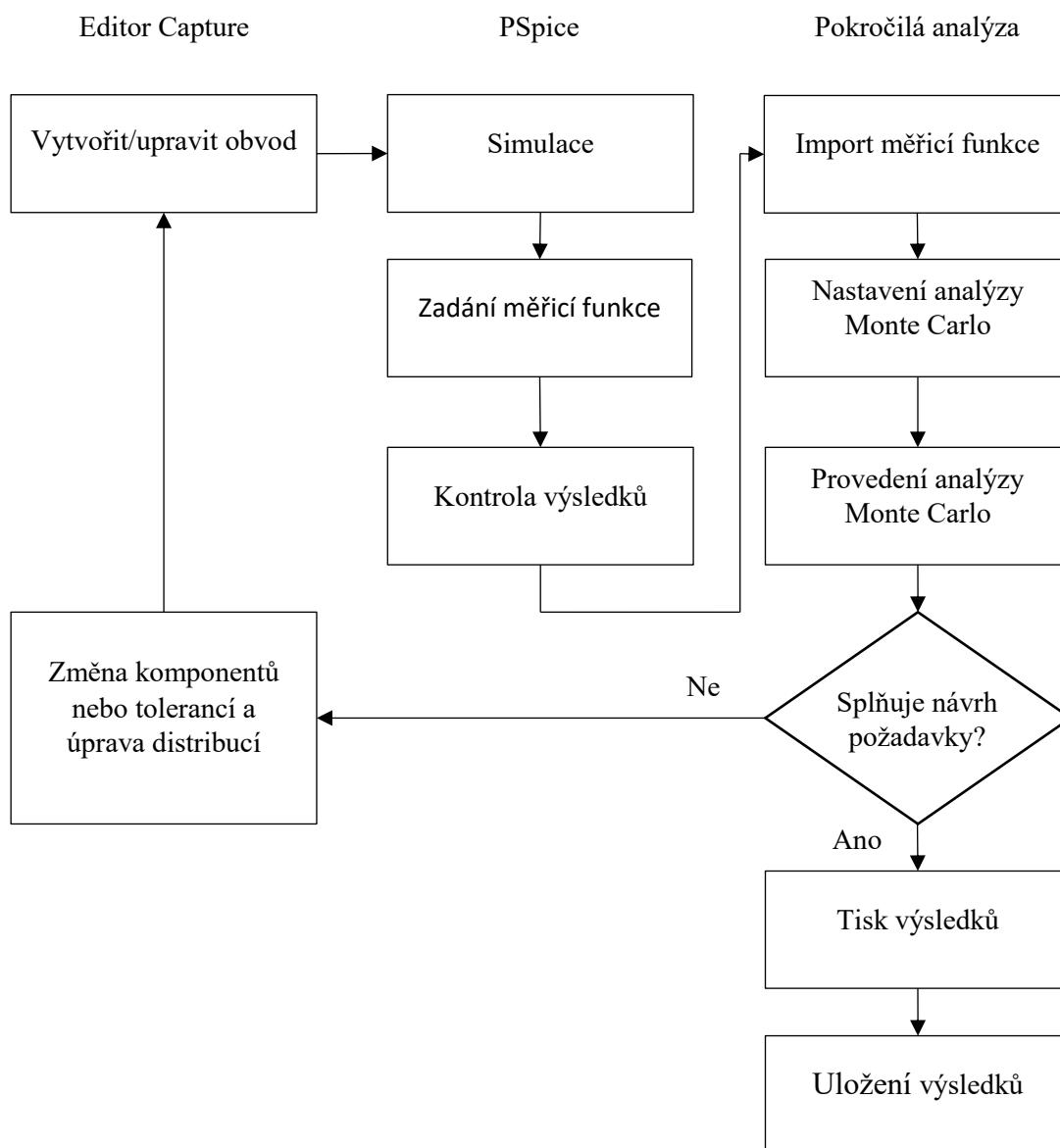
Analýza Monte Carlo, také analýza výtěžnosti výroby, zkoumá vlastnosti obvodu, ve kterém jsou parametry modelů součástek náhodně vybírány z určitého tolerančního pásma (vzorkování v oblasti tolerancí) dle dané distribuce. Náhodným výběrem hodnot se simuluje hromadná výroba. Tato analýza je založena na numerické simulační metodě Monte Carlo, která se používá k modelování náhodných dějů. Pravděpodobnost výběru hodnoty z tolerančního pásma závisí na distribuční funkci. Touto analýzou lze kromě výrobních tolerancí zohlednit různé vlivy, jako je teplota nebo stárnutí komponentů. Typickým příkladem využití analýzy hromadné výroby je návrh analogových filtrů.

Analýza monte Carlo probíhá ve smyčce stejně, jako citlivostní analýza. Rozdíl spočívá ve výběru hodnot parametrů. Prvním krokem je výběr hodnot a druhým je stejnosměrná, střídavá, nebo časová analýza. V první iteraci je stejně jako u citlivostní analýzy použito jmenovitých hodnot parametrů. V následných iteracích jsou již hodnoty vybírány z tolerančního pásma náhodně v souladu s distribucí.

Vzhledem ke statistické povaze algoritmu Monte Carlo vzrůstá přesnost výsledků při zvyšování počtu iterací. S počtem iterací také vzrůstá výpočetní náročnost, která tak může být omezením této analýzy. Výhodou je, že přesnost je nezávislá na počtu parametrů, ale náročnost ano. V případě velkého množství parametrů jde proces optimalizovat tak, že je nejprve provedena citlivostní analýza. Podle výsledků citlivostní analýzy se v analýze Monte Carlo odeberou tolerance prvkům, které mají dostatečně malý vliv na sledovanou charakteristiku, takže jejich rozptyly mohou být zanedbány.

Po provedení analýzy získáme množinu možných charakteristik určující oblast, ve které se může charakteristika daného zapojení nacházet. Získané výsledky se dále dají statisticky vyhodnotit. Ke statistickému vyhodnocení se převádí do histogramů, které jsou vizuálně přehlednější.

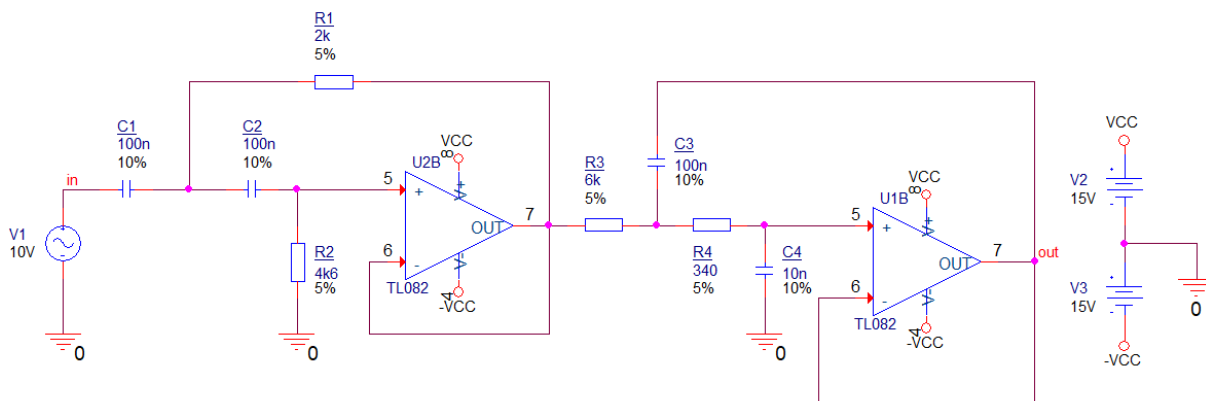
Na obrázku 3.14 je znázorněn pracovní postup. Zkoumaný obvod se nejprve vytvoří a připraví na analýzu Monte Carlo. Následně se provede analýza a zadají se měřicí funkce. Měřicí funkce se v případě použití modulu rozšířených analýz importují a provede se nastavená analýza Monte Carlo. Podle výsledků se upraví vstupní parametry analýzy – hodnoty prvků a případně topologie zapojení. Proces se opakuje, dokud zapojení nesplňuje dané požadavky. [1], [4], [10]



Obr. 3.14: Pracovní postup při analýze Monte Carlo. [10]

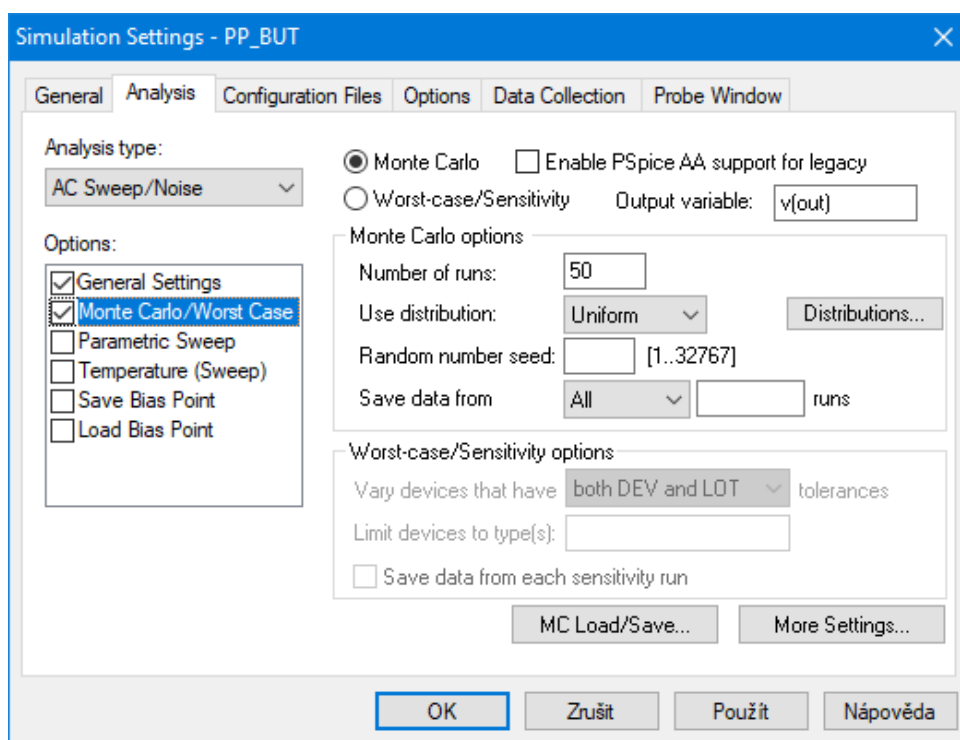
#### 4. příklad – statistická analýza pásmové propusti

Provedení analýzy Monte Carlo je demonstrováno na příkladu analogového filtru. Filtr je aktivní pásmová propust 4. řádu typu Butterworth. Schéma zapojení je na obrázku 3.15. Hodnoty tolerancí jsou pro rezistory 5 % a pro kapacitory 10 %.



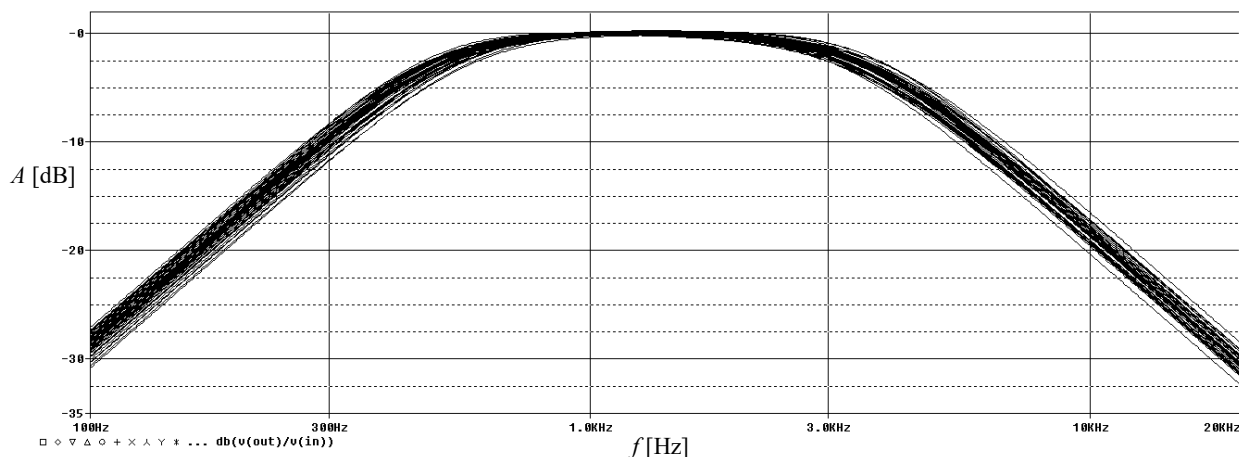
Obr. 3.15: Zapojení pásmové propusti 4. řádu.

Nastavení simulace:



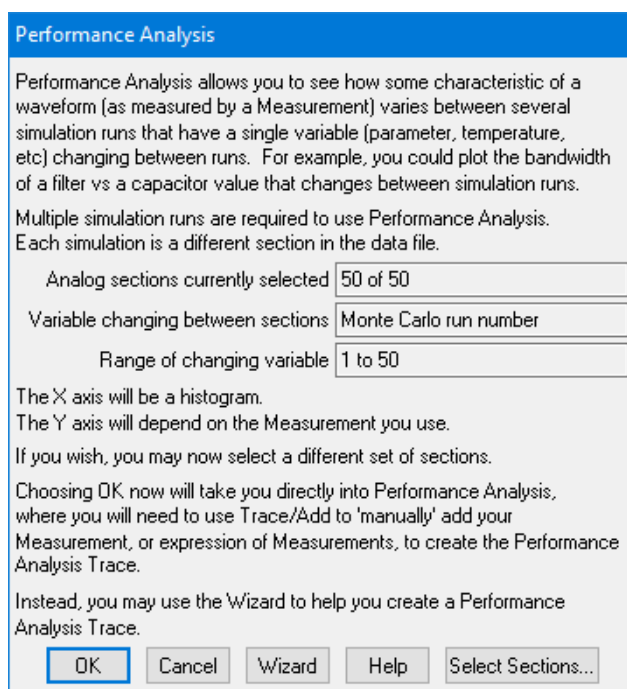
Obr. 3.16: Nastavení simulace Monte Carlo.

V nastavení na obrázku 3.16 se obdobně jako u citlivostní analýzy zadá výstupní veličina (Pro tu budou ve výstupním souboru vypsány odchylky z jednotlivých iterací.). Dále se nastaví počet iterací a distribuce. Distribuce nastavená v parametrech součástek se zde neuplatní. Výstupem je v sázek charakteristik odpovídajících simulacím s náhodnými hodnotami parametrů ze všech iterací viz obrázek 3.17.



Obr. 3.17: Amplitudové charakteristiky obvodu na obrázku 10 – analýza Monte Carlo.

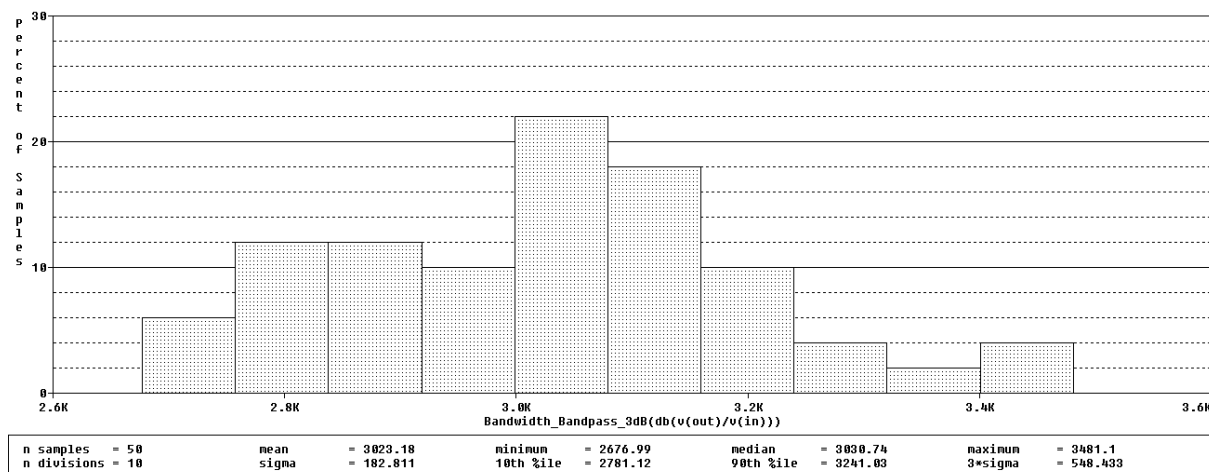
Svazek charakteristik na obrázku 3.17 umožňuje jen omezeně analyzovat vliv tolerancí. Při přidání měřicí funkce se spočítají a zobrazí hodnoty z jednotlivých iterací. K dalším měřením slouží nástroj Performance Analysis, který umožňuje provádět statistické výpočty s celým svazkem charakteristik.



Obr. 3.18: Dialogové okno spouštění nástroje Performance Analysis.

Nástroj se spustí skrz nabídku *Trace > Performance Analysis*. V editoru Probe se zobrazí souřadnicový systém, do kterého lze skrze *Trace > Add Trace...* zadat měřicí funkci. Výsledky se zobrazí formou histogramu.





Obr. 3.19: Histogram vytvořený nástrojem Performance Analysis.

V histogramu na obrázku 3.19 je ve sloupcích zobrazen procentuální podíl rozptylů hodnoty šířky pásma vypočtené výrazem  $\text{Bandwidth\_Bandpass\_3dB}(\text{db}(v(\text{out})/v(\text{in})))$ . Z histogramu lze například vyčíst, že v 22 % simulací byla šířka pásma v rozmezí 2998,9 Hz až 3079,1 Hz (Navržená hodnota šířky pásma pro daný filtr je 3 kHz.).

Další statistické údaje jsou uvedeny v tabulce pod histogramem. Tabulka obsahuje počet iterací, počet sloupců histogramu, průměrnou hodnotu, hodnotu sigmy, minimální a maximální hodnotu měřicí funkce, medián, ...

Nastavit počet intervalů histogramu jde skrz nabídku *Tools > Options... > Number of Histogram Divisions*. Výchozí hodnota je 10.

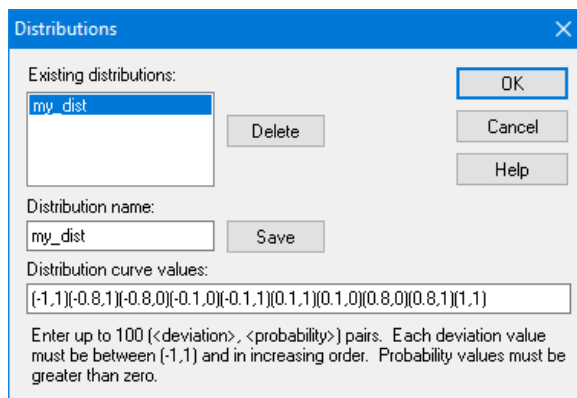
### Nastavení analýzy Monte Carlo

V nastavení na obrázku 3.16 jsou dále tyto možnosti:

*Enable PSpice AA support for legacy* – Umožní provést analýzu v modulu PSpice AA pro projekt vytvořený bez parametrizovaných modelů se zadáním tolerancí parametry DEV a LOT.

*Number of runs* – Počet iterací, maximum je 10 000.

*Use distribution* – Nastavení distribuce, ve výchozím stavu je hodnota Unifrom, další možnosti jsou Gaussian a GaussUser. Možnost GaussUser umožňuje nastavit hodnotu parametru sigma (směrodatné odchylky) distribuční funkce v rozmezí 1 až 9. Tlačítko s popisem *Distributions...* otevře okno pro zadání uživatelské distribuce (obrázek 3.20). Takto zadaná distribuce nemusí splňovat normovací podmínku.



Obr. 3.20: Zadání uživatelské distribuce.

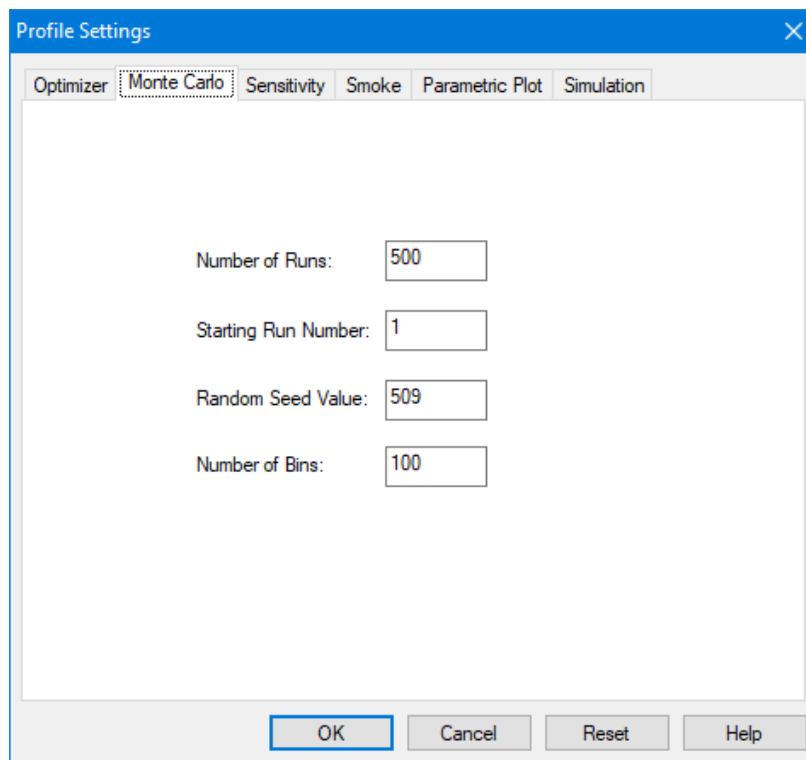
*Random number seed* – Základ pro generování náhodných čísel. Výchozí hodnota je 17533.

*Save data from* – Umožňuje uložit data jen z vybraných iterací. Při výběru možnosti <none> se uloží jen výsledek simulace se jmenovitými hodnotami. Výběrem možnosti Every a zadáním např. čísla 5 se uloží data z 1, 6, 11, ... iterace. Výběrem First a zadáním čísla  $n$  se uloží výsledky z prvních  $n$  iterací. Poslední možností je zadat výčet iterací pro uložení dat (Run (list)).

*MC Load/Save...* – Možnost uložit do souboru s příponou mcp (Monte Carlo Parameter) tabulku náhodně vygenerovaných hodnot parametrů (pomocí koeficientů), případně načíst uložené hodnoty pro další simulaci.

Pokud je v editoru Probe zobrazen svazek průběhů a je cílem zjistit, které náhodně vygenerované hodnoty odpovídají některému z nich, potom je třeba nejprve určit, o kterou iteraci se jedná. Na daný průběh se klikne RMB a v zobrazeném menu se zvolí možnost *Trace Information*. Tato možnost otevře okno s informacemi o daném průběhu, číslo iterace je označeno jako *Monte Carlo Pass*. Následně lze hodnoty vyjádřit právě pomocí informací z uloženého souboru mcp, nebo z výstupního souboru.

Další možnosti analýzy Monte Carlo obsahuje modul rozšířených analýz. Ukázka je provedena na stejném filtru. Modul rozšířených analýz má oddělené nastavení simulačního profilu. Nastavení se nachází v menu *Edit > Profile Settings...*



Obr. 3.21: Nastavení analýzy Monte Carlo v modulu rozšířených analýz.

Nastavení obsahuje položky:

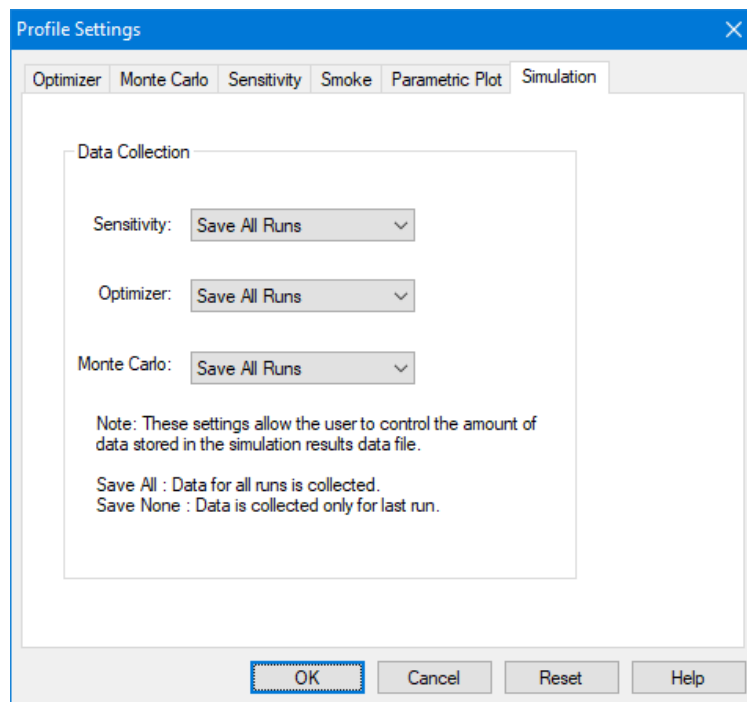
*Number of runs* – Počet iterací metody Monte Carlo (Maximum je 5000.).

*Starting Run Number* – Nastavení počáteční iterace.

*Random Seed Value* – Základ pro generování náhodných čísel.

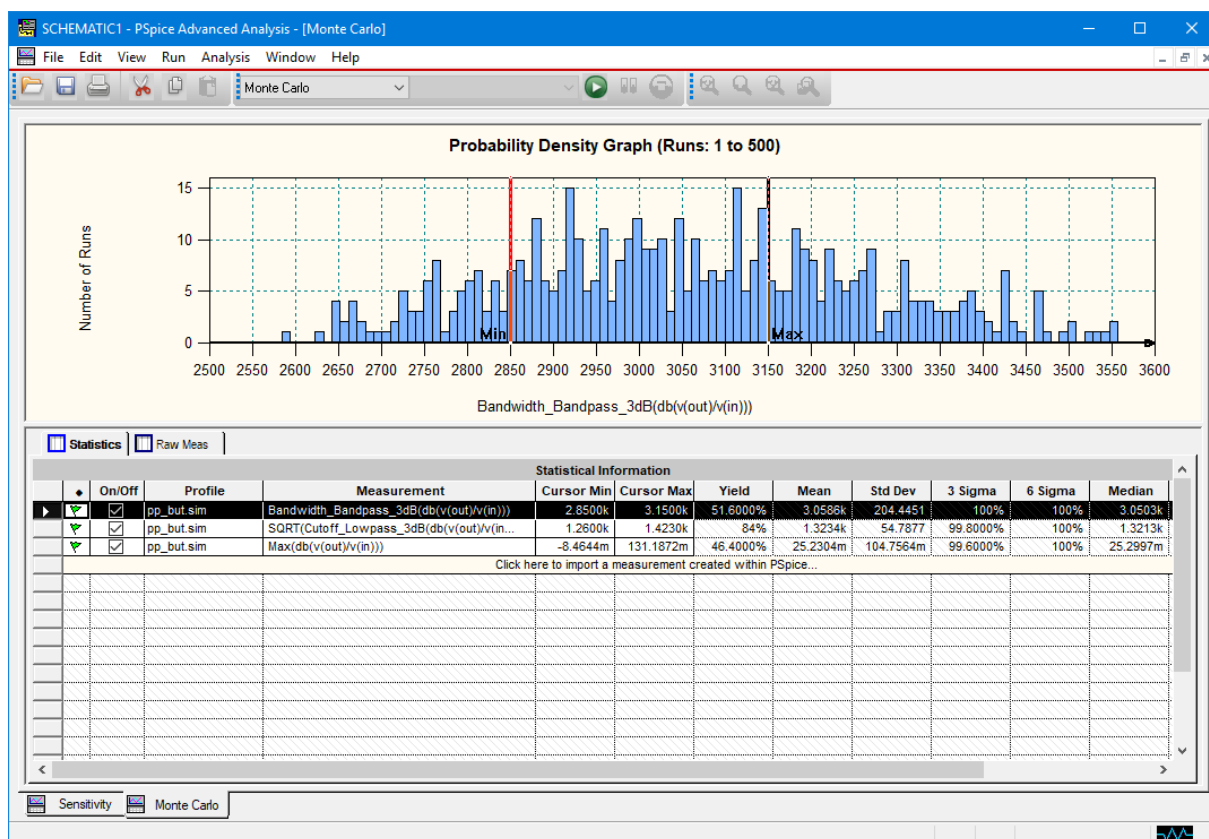
*Number of Bins* – Počet intervalů pro histogram.

Dále lze v kartě *Simulation* nastavit ukládání výstupních dat.



Obr. 3.22: Nastavení ukládání dat v modulu rozšířených analýz.

Po provedení nastavení se ve spodní části okna importují měřicí funkce a analýza se spustí tlačítkem Start.

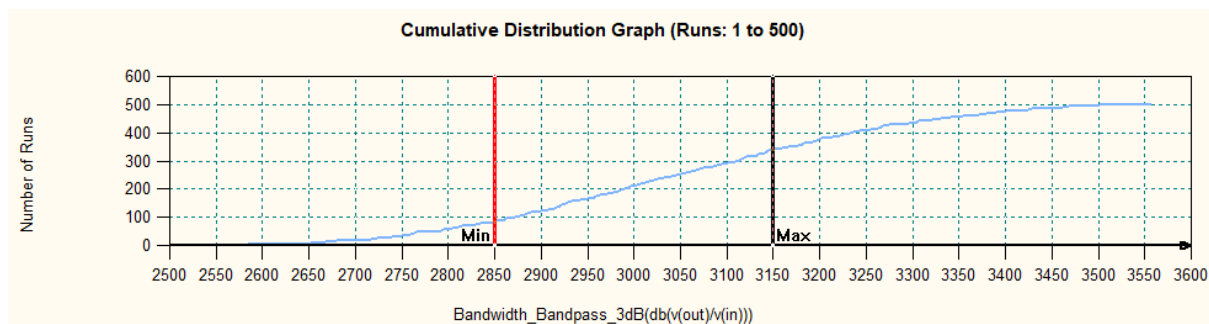


Obr. 3.23: Výsledky analýzy Monte Carlo v modulu rozšířených analýz.

Výsledky se zobrazí formou grafu a tabulky – obrázek 3.23. Tabulka ve spodní části okna obsahuje měřicí funkce. Ve sloupcích *Cursor Min* a *Cursor Max* jsou hodnoty polohy kurzorů ve zobrazeném grafu. Ve sloupci *Yield* je uvedena výtěžnost výroby. Dále je uvedena střední hodnota, směrodatná odchylka, zastoupení výsledů v intervalech  $3\sigma$  a  $6\sigma$ . Kliknutím LMB na řádek tabulky lze přepnout na graf pro danou měřicí funkci. V posledním sloupci je uveden medián. V kartě *Raw Meas* jsou uvedeny výsledky měřicích funkcí z jednotlivých iterací.

V horní části okna je vykreslen histogram pro odhad funkce rozložení hustoty pravděpodobnosti. Datové kurzory *Min* a *Max* slouží k výběru intervalu přijatelnosti hodnoty měřicí funkce. Poloha označeného kurzoru (označen červeně) se nastaví kliknutím LMB na příslušné místo v grafu. Druhý kurzor se označí kliknutím LMB. Přesnou polohu datového kurzoru je možné zadat ve sloupcích *Cursor Min* a *Cursor Max* ve zobrazené tabulce.

Kliknutím RMB a výběrem položky *CDF Graph* dojde k přepnutí na graf distribuční funkce – obrázek 3.24.



Obr. 3.24: Distribuční funkce v modulu rozšířených analýz.

Výstupním soubor (*View > Log File > Monte Carlo*) obsahuje použité hodnoty parametrů a výsledky měřicích funkcí z jednotlivých iterací.

## 4 Další příklady

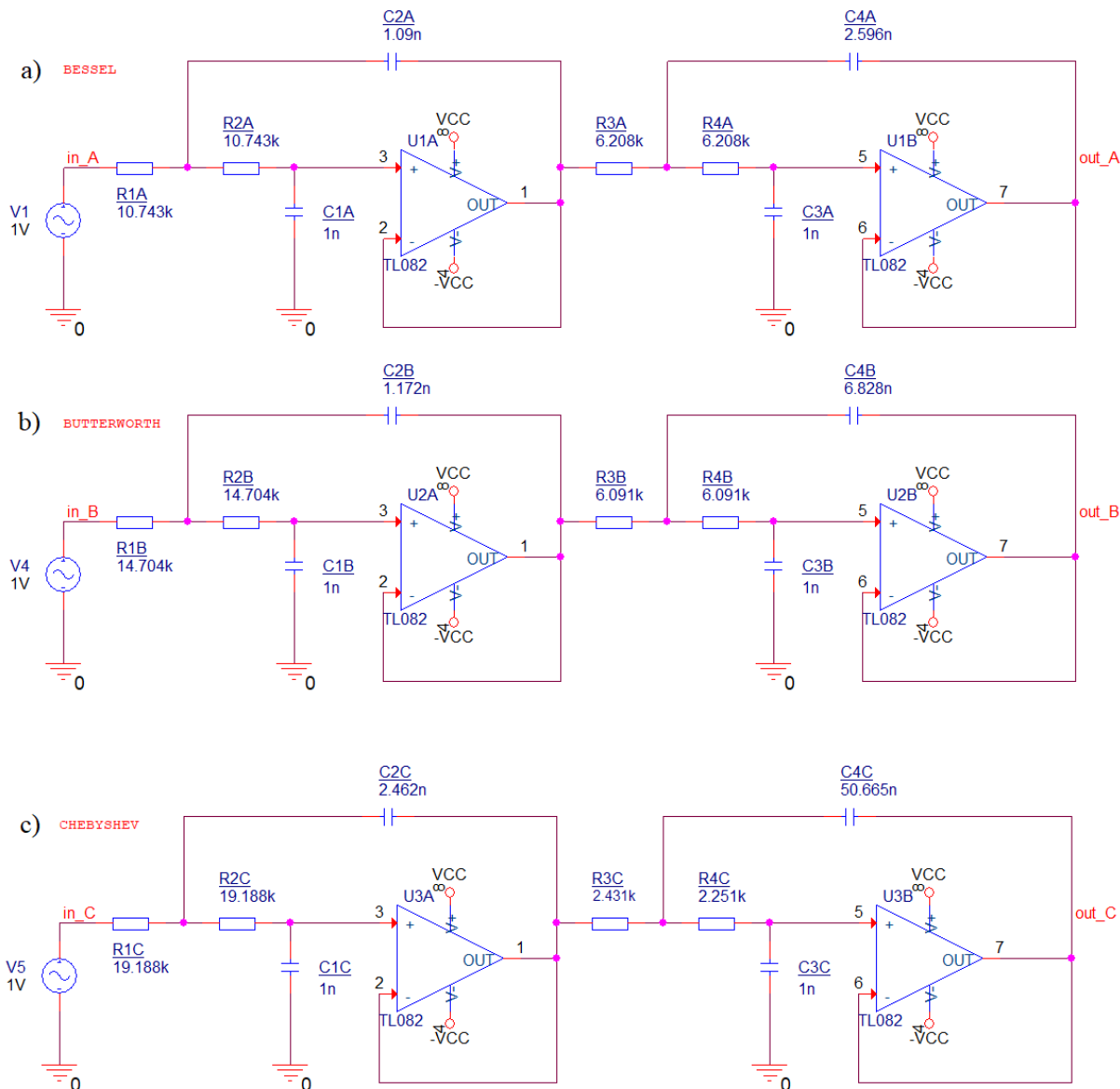
### 5. příklad optimalizace výtěžnosti výroby

Jednou z možností, jak zvýšit výtěžnost výroby je předpokládat konstantní hodnoty tolerancí a měnit jmenovité hodnoty použitých součástek. Tento postup je demonstrován na tomto příkladu. Cílem je navrhnout filtr s maximální výtěžností výroby.

Požadovaný filtr je dolní propust 4. řádu. Filtr je vytvořen kaskádním řazením dvou filtrů s topologií Sallen-Key. Pro maximalizaci výtěžnosti výroby jsou stanoveny hodnoty použitých rezistorů a kapacitorů pro 3 různé typy filtrů. Tolerance i topologie filtru je pro různé typy shodná, změna jmenovitých hodnot je provedena pomocí změny typu filtru. Filtry jsou navrženy pro:

- stejnou hodnotu mezního kmitočtu  $f_z = 10 \text{ kHz}$
- minimální útlum v nepropustném pásmu 40 dB

Navržené filtry jsou typu a) Butterworth, b) Čebyšev a c) Bessel. Pro demonstraci optimalizace výroby, kde se mění pouze jmenovité hodnoty, jsou uvažovány vypočtené hodnoty součástek zaokrouhlené na 3 desetinná místa.



Obr. 4.1: Různé typy filtru typu dolní propust.

Hodnoty všech kapacitorů a rezistorů jsou vybrány z řady E24 s tolerancí 5 %. Následně je provedena citlivostní analýza a analýza Monte Carlo pro stanovení výtěžnosti výroby.

## Měřicí funkce

Mezní kmitočet:

$$\text{Cutoff\_Lowpass\_3dB}(\text{db}(\text{v}(\text{out\_A})/\text{v}(\text{in\_A})))$$

Minimální útlum v nepropustném pásmu:

$$\text{Max\_XRange}(\text{db}(\text{v}(\text{out\_A})/\text{v}(\text{in\_A})), 50\text{k}, 100\text{k})$$

Tab. 4: Výsledky citlivostní analýzy pro mezní kmitočet v příkladu 5.

Typ filtru	$f_z$ [kHz]	$f_{zMIN}$ [kHz]	$f_{zMAX}$ [kHz]
Bessel	9,9342	8,5763	11,5325
Butterworth	9,9881	9,0600	11,0663
Čebyšev	10,0318	9,1019	11,1107

Tab. 5: Výsledky citlivostní analýzy pro minimální útlumu v příkladu 5.

Typ filtru	$A_{MIN}$ [dB]	$A_{MIN\_MIN}$ [dB]	$A_{MIN\_MAX}$ [dB]
Bessel	-42,2586	-45,5662	-38,8023
Butterworth	-56,0060	-59,3901	-52,4488
Čebyšev	-67,7363	-71,1726	-64,1119

Druhý sloupec v tabulkách 4 a 5 obsahuje hodnoty měřicích funkcí při simulaci se jmenovitými hodnotami, v dalších sloupcích jsou maximální a minimální hodnoty nejhorších případů. Pro optimalizaci výtěžnosti výroby je stanoveno, že vzorek splňuje požadavky, když hodnoty měřicích funkcí budou v intervalu  $\pm 10\%$  od požadované hodnoty zlomového kmitočtu a pokud je útlum v zádržném pásmu větší, než 38 dB. Podmínka pro útlum je splněna u všech filtrů i v nalezených nejhorších případech. Proto bude analýza Monte Carlo zaměřena především na mezní kmitočet.

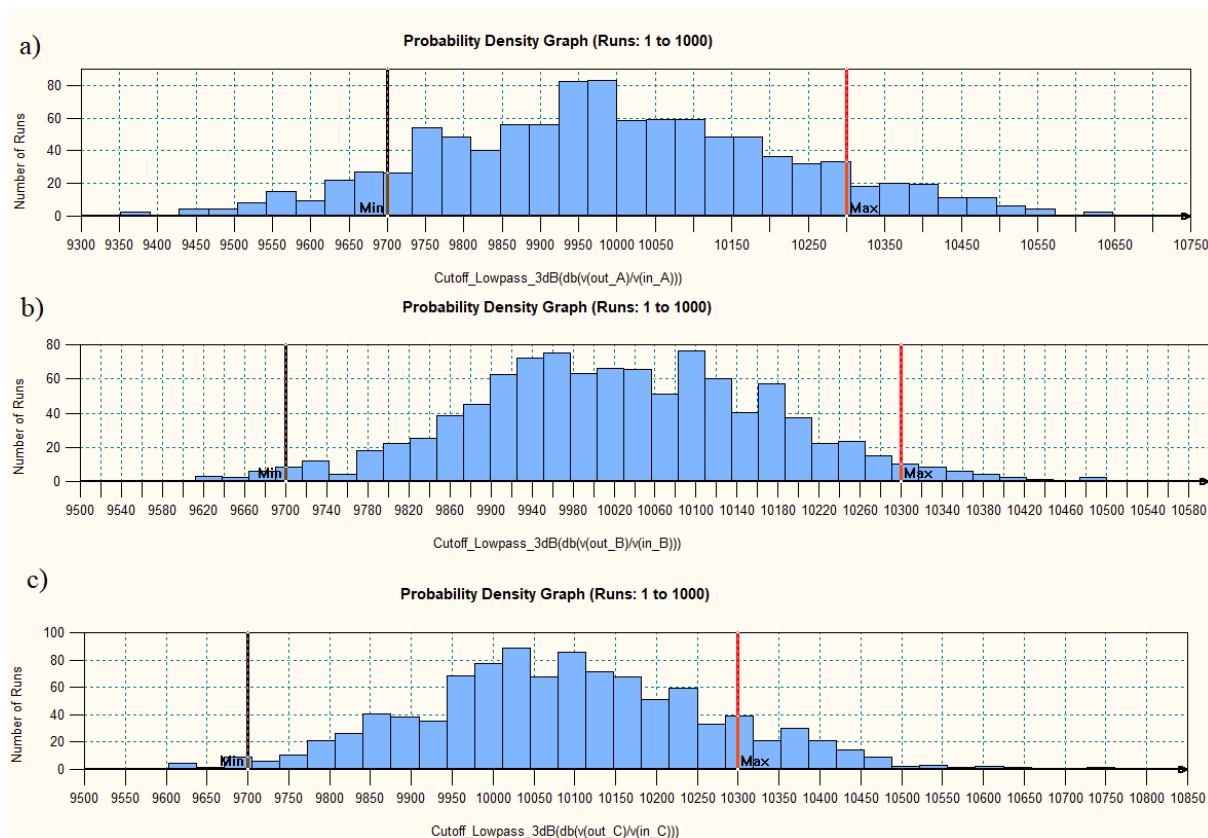
Tab. 6: Výsledky analýzy Monte Carlo.

Measurement	Cursor Min	Cursor Max	Yield	Mean	Std Dev	3 Sigma	Median
Cutoff_Lowpass_3dB(db(v(out_C)/v(in_C)))	9.7000k	10.3000k	86.8 %	10.0898k	176.2707	99.7 %	10.0836k
Cutoff_Lowpass_3dB(db(v(out_B)/v(in_B)))	9.7000k	10.3000k	96.2 %	10.0262k	144.0091	99.8 %	10.0220k
Cutoff_Lowpass_3dB(db(v(out_A)/v(in_A)))	9.7000k	10.3000k	81 %	9.9947k	224.8837	100 %	9.9847k
Max_XRange(db(v(out_B)/v(in_B)), 50k,100k)	-58.2629	-53.8162	100 %	-55.8086	425.5045m	99.7 %	-55.8094
Max_XRange(db(v(out_C)/v(in_C)), 50k,100k)	-69.2721	-64.6250	100 %	-67.5376	455.9830m	99.5 %	-65.5413
Max_XRange(db(v(out_A)/v(in_A)), 50k,100k)	-44.0123	-40	100 %	-42.0606	399.8353m	99.9 %	-42.0690

V tabulce 6 jsou výsledky analýzy Monte Carlo v modulu rozšířených analýz. Ve 4. sloupci jsou stanovené výtěžnosti výroby. Pro filtr typu Bessel je výtěžnost 81 %, pro Butterworth 96,2 % a pro Čebyšev 86 %. Výrazné rozdíly je možné zdůvodnit posunem oblasti tolerancí popsané v 3. kapitole. Důvod je také patrný z obrázku 4.2, na kterém jsou PDF pro mezní kmitočet.

Na posledních třech řádcích tabulky 6 lze také vidět, že předpoklad 100 % výtěžnosti podle analýzy nejhoršího případu (tabulka 5) je správný.





Obr. 4.2: Výsledek analýzy Monte Carlo – PDF pro mezní kmitočty filtrů typu a) Bessel b) Butterworth a c) Čebyšev.

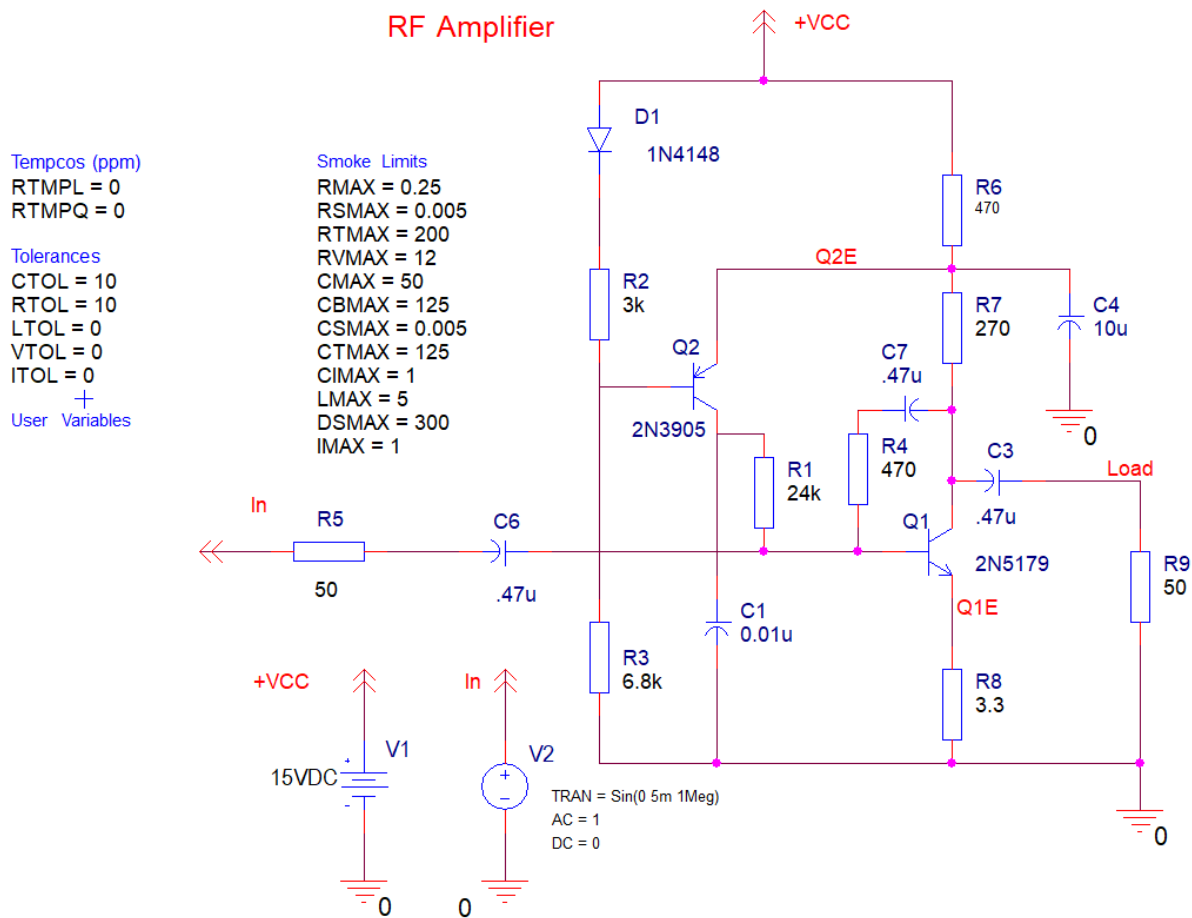
Další možností zlepšení výtěžnosti výroby je snížení tolerancí použitých pasivních prvků. Při snížení tolerancí rezistorů a kapacitorů na 2 %, je dosaženo 100% výtěžnosti výroby všech sledovaných hodnot u filtrů typu Bessel a Butterworth.

## Shrnutí

V 5. příkladu je demonstrován princip využití statistické a toleranční analýzy k optimalizaci výroby. Z výsledků je patrné, že změna jmenovitých hodnot je účinným způsobem optimalizace výroby podobně jako snížení tolerancí použitých součástek.

## 6. příklad – analýza RF zesilovače

Zatím uvedené příklady neobsahovaly parametrizované modely polovodičových součástek. Jejich použití je ukázáno na příkladu, který se nachází v instalačním adresáři balíku OrCAD. Projekt se nachází v adresáři `..\\PSpice\\tutorial\\Capture\\pspiceaa\\rfamp`.



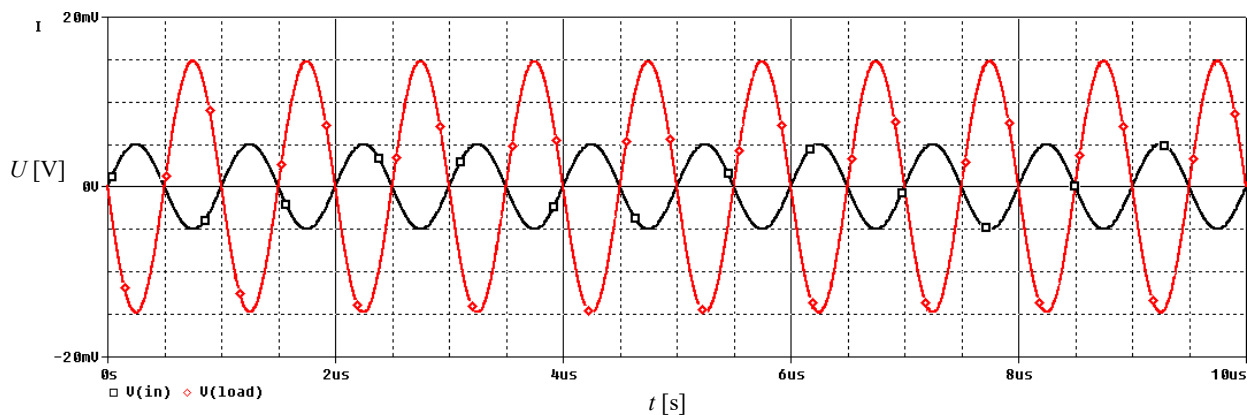
Obr. 4.3: Schéma ukázkového projektu pro demonstraci rozšířených analýz.

Zapojení obsahuje parametrizované modely. Například tranzistor Q1 s modelem 2N5179 tak umožňuje zadat tolerance do tabulky, které se při jeho otevření zobrazí v Model Editoru viz obrázek 4.4. Dále je ve schématu prvek VARIABLES pro zadání tolerancí a dalších parametrů.

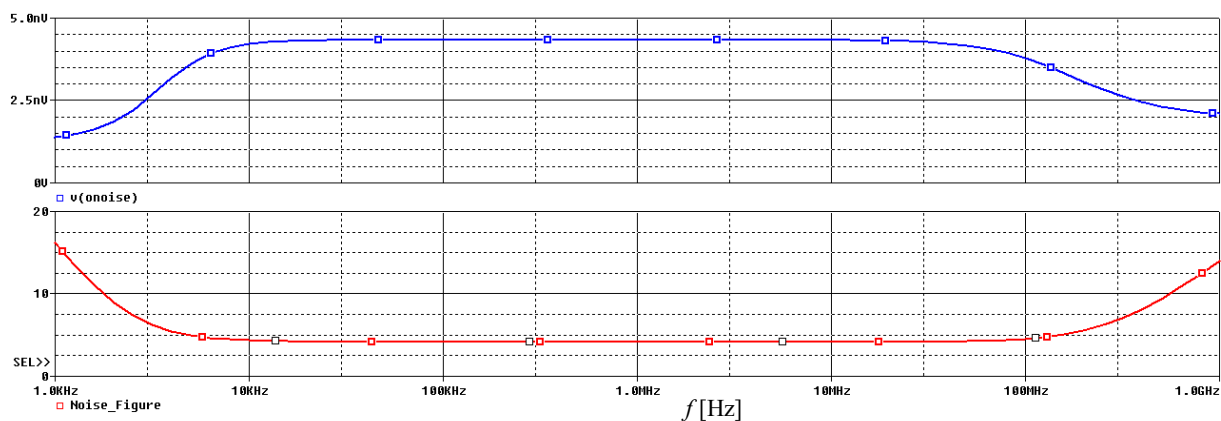
Simulation Parameters								
Property Name	Description	Value	Default	Unit	Distribution	Postol	Negtol	Editable
IS	Saturation current	4.479E-15	0.1f	A				<input checked="" type="checkbox"/>
BF	Maximum forward beta	83	100					<input checked="" type="checkbox"/>
NF	Ifwd emission coef.	1.07	1					<input checked="" type="checkbox"/>
VA	Fwd early voltage	24	100MEG	V				<input checked="" type="checkbox"/>
IKF	Hi cur. beta rolloff	100E-3	10	A				<input checked="" type="checkbox"/>
ISE	B-E leakage cur.	347.1E-12	1E-13	A				<input checked="" type="checkbox"/>
NE	B-E leak emis. coef.	3.66	1.5					<input checked="" type="checkbox"/>
BR	Max reverse beta	1.0	1					<input checked="" type="checkbox"/>
NR	Irev emission coef.	1.07	1					<input checked="" type="checkbox"/>
VAR	Rev. early voltage	500	100MEG	V				<input checked="" type="checkbox"/>
ISC	B-C leakage cur.	0	1E-15	A				<input checked="" type="checkbox"/>
NC	B-C leak emis. coef.	1.0	2					<input checked="" type="checkbox"/>
RB	Zero bias Rbase	36	0	Ohm				<input checked="" type="checkbox"/>
RRM	Min base resistance	36	0	Ohm				<input checked="" type="checkbox"/>

Obr. 4.4: Model editor s otevřeným parametrizovaným modelem tranzistoru 2N5179.

Projekt má 2 simulační profily, jeden pro časovou analýzu a druhý pro střídavou analýzu. Po provedení časové analýzy jsou výsledkem průběhy výstupního a vstupního napětí zesilovače. Průběhy jsou zobrazeny na obrázku 4.5 červeně výstupní napětí a černě vstupní napětí.



Obr. 4.5: Průběhy vstupního a výstupního napětí zesilovače.



Obr. 4.6: Výsledek šumové analýzy – modře šumové napětí červeně a šumové číslo.

K průběhům na obrázcích jsou vytvořeny následující měřicí funkce:

- $\max(\text{db}(v(\text{load})))$  – maximální zesílení
- $\text{bandwidth}(v(\text{load}), 3)$  – šířka pásma
- $\min(10 \cdot \log_{10}(v(\text{inoise}) \cdot v(\text{inoise}) / 8.28 \cdot 10^{-19}))$  – minimální hodnota šumového čísla
- $\max(v(\text{onoise}))$  – maximální hodnota šumového napětí

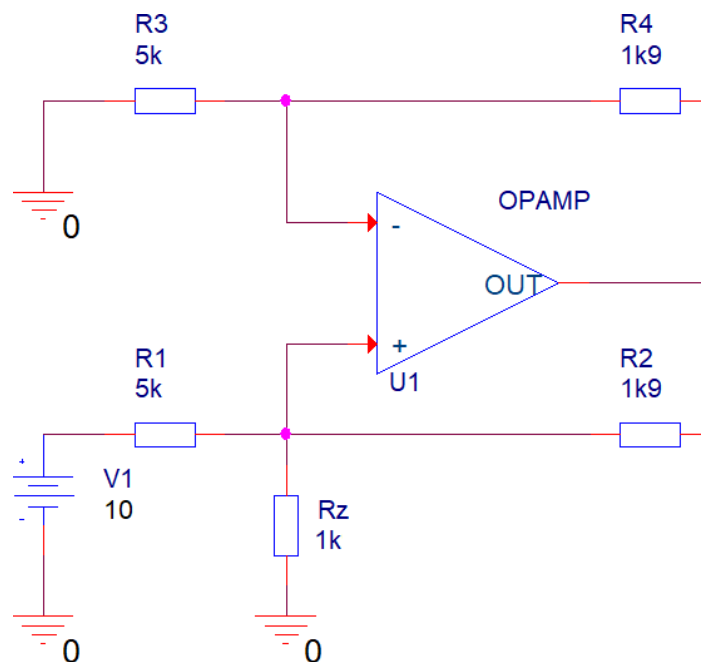
Po otevření modulu rozšířených analýz, například citlivostní analýzy a importování měřicích funkcí lze provést citlivostní analýzu – obrázek 4.7.

Parameters							
	Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity	Linear
►	R4	VALUE	470	517	423	-471.0070k	99
	R8	VALUE	3.3000	2.9700	3.6300	370.2794k	78
	R6	VALUE	470	423	517	315.5304k	66
	R9	VALUE	50	45	55	277.2976k	58
	R5	VALUE	50	55	45	-252.4072k	53
	R3	VALUE	6.8000k	6.1200k	7.4800k	222.6479k	47
	R2	VALUE	3k	3.3000k	2.7000k	-211.4436k	44
	R7	VALUE	270	243	297	50.3472k	10
	C6	VALUE	0.4700u	517n	423n	-10.1939	< MIN >
	C1	VALUE	0.0100u	9n	11n	18.2368m	< MIN >
	R1	VALUE	24k	26.4000k	21.6000k	-422.7539	< MIN >
	C3	VALUE	0.4700u	423n	517n	1.0430	< MIN >
	C4	VALUE	10u	11u	9u	-33.5423m	< MIN >
	C7	VALUE	0.4700u	517n	423n	-11.4606	< MIN >
Specifications							
	On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max	
▼	<input checked="" type="checkbox"/>	ac.sim	max(db(v(load)))	9.4181	7.3142	11.3819	
►	<input checked="" type="checkbox"/>	ac.sim	bandwidth(v(load),3)	150.5788m...	130.3443m...	174.8395m...	
▼	<input checked="" type="checkbox"/>	ac.sim	min(10*log10(v(noise)*v(noise)/8.28e-19))	4.1481	3.6360	4.7507	
▼	<input checked="" type="checkbox"/>	ac.sim	max(v(onoise))	4.3383n	3.5366n	5.2793n	
Click here to import a measurement created within PSpice...							

Obr. 4.7: Výsledky citlivostní analýzy zesilovače.

## 7. příklad korelované tolerance

V dosud uvedených příkladech byly použity pouze nekorelované tolerance DEV. Tento příklad demonstruje simulaci s uvažováním korelovaných tolerancí LOT. V této demonstraci bude sledován Howlandův zdroj proudu. Cílem je zjistit maximální proud, který může zdroj dodávat, pokud jsou uvažovány tolerance použitých rezistorů.



Obr. 4.8: Zdroj konstantního proudu.

V zapojení na obrázku 4.8 je proud rezistorem  $R_z$  nezávislý na hodnotě  $R_z$ . Proud závisí na napětí zdroje  $V_1$  a hodnotách použitých rezistorů. Pro zadané hodnoty je nominální hodnota proudu rezistorem  $R_z$  2 mA.

Pro zjištění maximální hodnoty proudu jsou použity pro rezistory  $R_1$  až  $R_4$  modely Rbreak s tolerancí DEV a LOT:

.model Rbreak RES R=1 DEV=1% LOT=2%

Následně je nastavena stejnosměrná analýza a analýza nejhoršího případu podle obrázku 4.9.

The image displays two screenshots of the PSpice Analysis Settings dialog box, specifically the 'Analysis' tab.

**Top Screenshot:**

- Analysis type:** DC Sweep
- Options:**
  - ☒ Primary Sweep
  - ☐ Secondary Sweep
  - ☒ Monte Carlo/Worst Case
  - ☐ Parametric Sweep
  - ☐ Temperature (Sweep)
  - ☐ Save Bias Point
  - ☐ Load Bias Point
- Sweep variable:**
  - ☒ Voltage source (Name: V1)
  - ☐ Current source
  - ☐ Global parameter
  - ☐ Model parameter
  - ☐ Temperature
- Sweep type:**
  - ☐ Linear
  - ☐ Logarithmic (Decade)
  - ☒ Value list (5)

**Bottom Screenshot:**

- Analysis type:** DC Sweep
- Options:**
  - ☒ Primary Sweep
  - ☐ Secondary Sweep
  - ☒ Monte Carlo/Worst Case
  - ☐ Parametric Sweep
  - ☐ Temperature (Sweep)
  - ☐ Save Bias Point
  - ☐ Load Bias Point
- Worst-case/Sensitivity options:**
  - ☐ Monte Carlo
  - ☒ Worst-case/Sensitivity (Output variable: I(Rz))
- Monte Carlo options:**
  - Number of runs: 1
  - Use distribution: Uniform
  - Random number seed: 1..32767
  - Save data from: All runs
- Worst-case/Sensitivity options:**
  - Vary devices that have: only LOT tolerances
  - Limit devices to type(s):
  - ☒ Save data from each sensitivity run

Obr. 4.9: Nastavení analýzy nejhoršího případu pro Howlandův zdroj proudu.

Podle nastavení na obrázku 4.9 jsou uvažovány pouze korelované tolerance. Tabulka z výstupního souboru:

*Tab. 7: Úprava hodnot při analýze nejhoršího případu pro korelované tolerance.*

WORST CASE ALL DEVICES

\*\*\*\*\*

Device	MODEL	PARAMETER	NEW VALUE
R_R3	Rbreak	R	.98 (Decreased)
R_R4	Rbreak	R	.98 (Decreased)
R_R1	Rbreak	R	.98 (Decreased)
R_R2	Rbreak	R	.98 (Decreased)

Zjištěné maximum je 102,04 % z jmenovité hodnoty proudu. Následně jsou nastaveny hodnoty rezistorů podle tabulky z výstupního souboru na 98 % své jmenovité hodnoty. Znovu je provedena analýzy nejhoršího případu, ale tentokrát je nastaveno použití pouze tolerancí DEV:

*Tab. 8: Úprava hodnot při analýze nejhoršího případu pro nekorelované tolerance.*

WORST CASE ALL DEVICES

\*\*\*\*\*

Device	MODEL	PARAMETER	NEW VALUE
R_R3	Rbreak	R	.99 (Decreased)
R_R4	Rbreak	R	1.01 (Increased)
R_R1	Rbreak	R	.99 (Decreased)
R_R2	Rbreak	R	.99 (Decreased)

Zjištěná nejvyšší hodnota proudu je 101,43 % z hodnoty po úpravě hodnot rezistorů.

Nejhorší případ tak lze vyjádřit jako  $2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0204 \cdot 1,0143 = 2,07 \text{ mA}$ . Pokud by byla rovnou provedena analýzy nejhoršího případu s nastaveným použitím tolerancí DEV a LOT zároveň, program by dospěl k nesprávnému výsledku.

## 5 Sylab a laboratorní úloha

Sylab obsahuje stručný úvod do popsaných analýz. Pro jednotlivé analýzy je vysvětlen jejich význam a je uvedena ukázka nastavení simulačních profilů. Uvedená laboratorní úloha je rozdělena na 2 části. První část zahrnuje příklad na citlivostní analýzu a analýzu nejhoršího případu. Druhá část zahrnuje příklad na analýzu Monte Carlo.

### 5.1 Sylab

#### Statistická a toleranční analýza

Statistická a toleranční analýza je souhrn metod sloužících k prověření vlastností obvodu při uvažování odchylek od jmenovitých hodnot parametrů použitých součástek. Například při použití rezistorů z řady s danou tolerancí, nebo použití tranzistoru s daným rozptylem parametrů, jako je proudový zesilovací činitel.

V prostředí OrCAD jsou dostupné 3 možnosti toleranční analýzy

1. Citlivostní analýza
2. Analýza nejhoršího případu
3. Analýza Monte Carlo

Obvyklým postupem je nejprve vytvořit zkoumané zapojení a provést na něm základní analýzu. Například ověřit polohu stejnosměrného pracovního bodu, nebo zobrazit průběh frekvenční charakteristiky filtru. Pokud obvod správně funguje, následuje jeho příprava na toleranční analýzu. Ta spočívá v zadání distribucí a tolerancí.

Zadání tolerancí pasivním prvkům se provede dvojklikem na daný prvek LMB (případně kliknutím RMB > *Edit Properties...*) a následným zadáním hodnoty parametru TOLERANCE v procentech (včetně znaku procenta) do zobrazené tabulky. Distribuce se zadá do parametru DIST. Například FLAT pro uniformní rozdělení, nebo GAUSS pro normální rozdělení. Tolerance je uvažována symetrická.

Zadání nesymetrických tolerancí lze provést použitím pasivních parametrizovaných prvků z knihovny pspice\_elem. V jejich modelech jsou pro tento účel parametry POSTOL a NEGTO.

Zadání tolerancí parametrům jiných modelů se provádí editací modelu v Model Editoru. Za příslušný parametr se doplní informace o toleranci a distribuci. Na součástku se klikne RMB a z nabídky se zvolí možnost *Edit PSpice Model*. Následně se ve spodní části Model Editoru upraví model. Například pro rezistor Rbreak z knihovny breakout se zadá tolerance 10 % s Gaussovou distribucí následovně:

```
.model Rbreak RES R=1 DEV/GAUSS = 10%
```

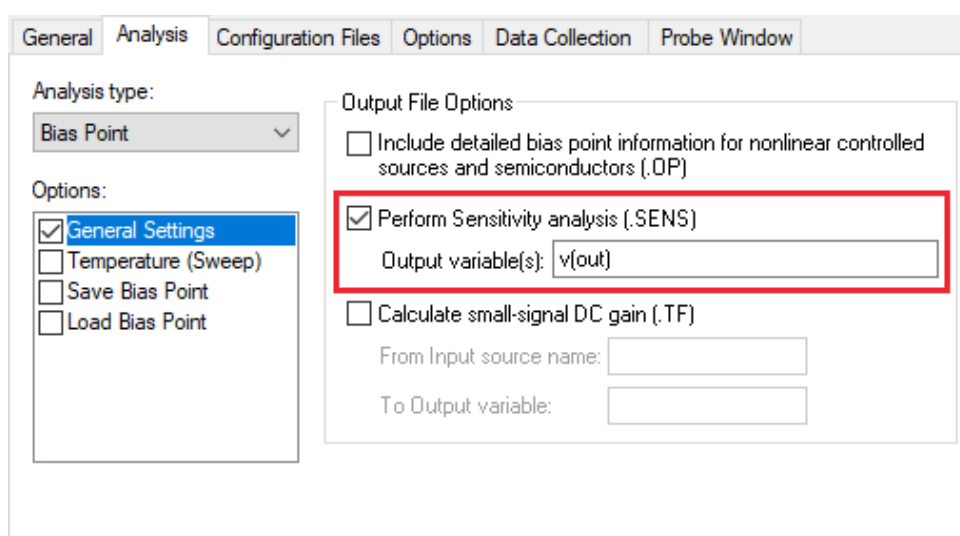
Poslední krok před provedením toleranční analýzy je nastavení simulačního profilu, které je vysvětleno v následujícím textu.

## Citlivostní analýza

Slouží k identifikaci prvků, které sledovanou charakteristiku obvodu ovlivňují nejvíce. Výsledkem je zhodnocení vlivu jednotlivých komponentů a srovnání s ostatními komponenty. V OrCADu jsou dva základní typy citlivosti:

1. Semirelativní – Udává absolutní změnu sledované veličiny při změně hodnoty parametru o 1 %.
2. Absolutní – Vyjadřuje poměr změny výstupní veličiny a změny daného parametru o jednu jednotku.

Základní výpočet citlivosti na všechny obvodové parametry umožňuje analýza stejnosměrného pracovního bodu. Pro analýzu stačí povolit výpočet citlivosti a zadat sledovanou veličinu. Nastavení je na obrázku 5.1.



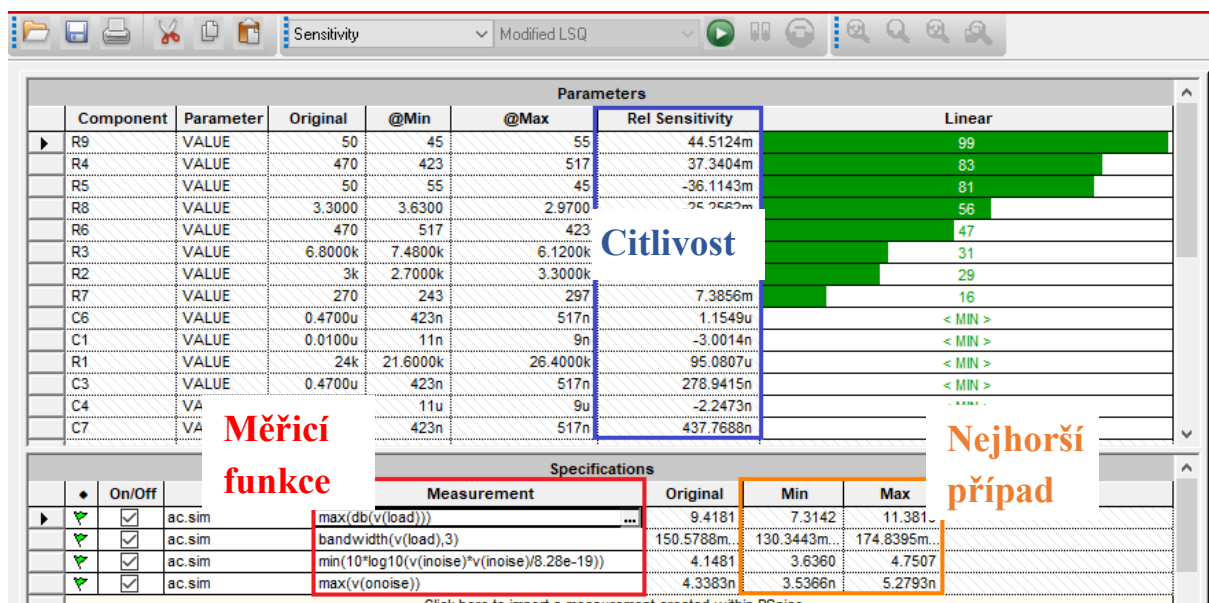
Obr. 5.1: Nastavení analýzy citlivosti stejnosměrného pracovního bodu.

Výsledek analýzy se zaznamená do výstupního souboru formou tabulky, tabulka obsahuje absolutní i semirelativní citlivost. Pro tuto analýzu není nutné zadání tolerancí.

Další možnosti výpočtu citlivosti obsahuje modul rozšířených analýz. V tomto modulu se simulací stanoví citlivost libovolné měřicí funkce (Measurement Expression) zadané po provedení základní analýzy.

Modul se spustí skrz hlavní nabídku *PSpice > Advanced Analysis > Sensitivity*. V modulu se skrz nabídku *Analysis > Sensitivity > Import Measurements...* importuje měřicí funkce a následně je možné analýzu spustit. Výsledky se zobrazí v přehledné tabulce obsahující jmenovité hodnoty, hodnoty prvků pro nejhorší případ a semirelativní/absolutní citlivost viz obrázek 5.2.

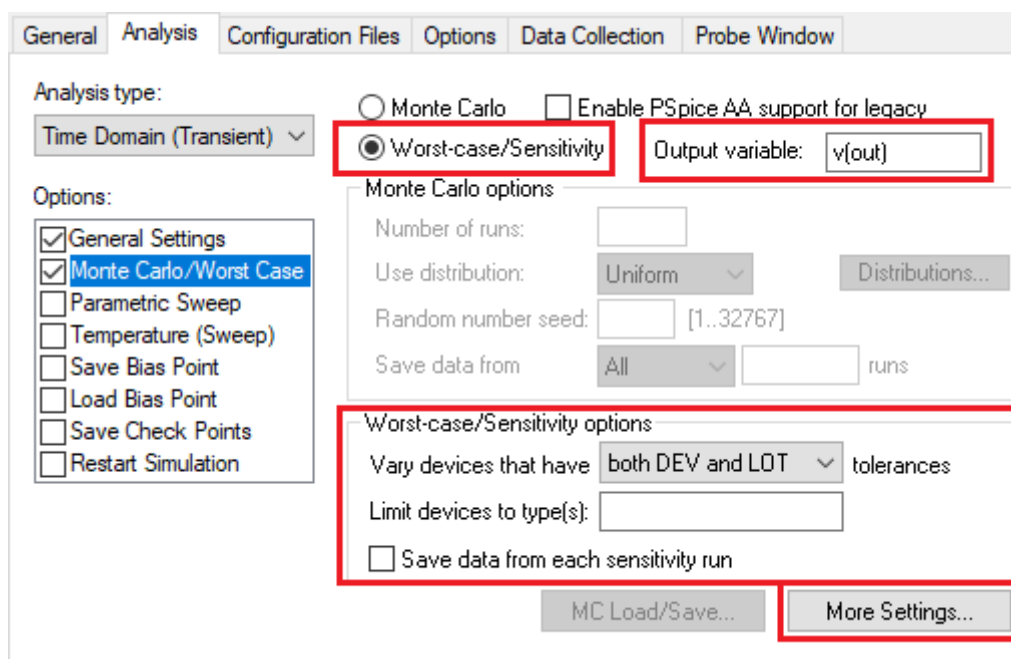




Obr. 5.2: Citlivostní analýza v modulu rozšířených analýz.

### Analýza nejhoršího případu

Z obrázku 5.2 je patrné, že analýza nejhoršího případu probíhá souběžně s citlivostní analýzou. Další možnost analýzy nejhoršího případu pro střídavou, stejnosměrnou, nebo časovou analýzu je obsažena v nastavení simulačního profilu viz obrázek 5.3.



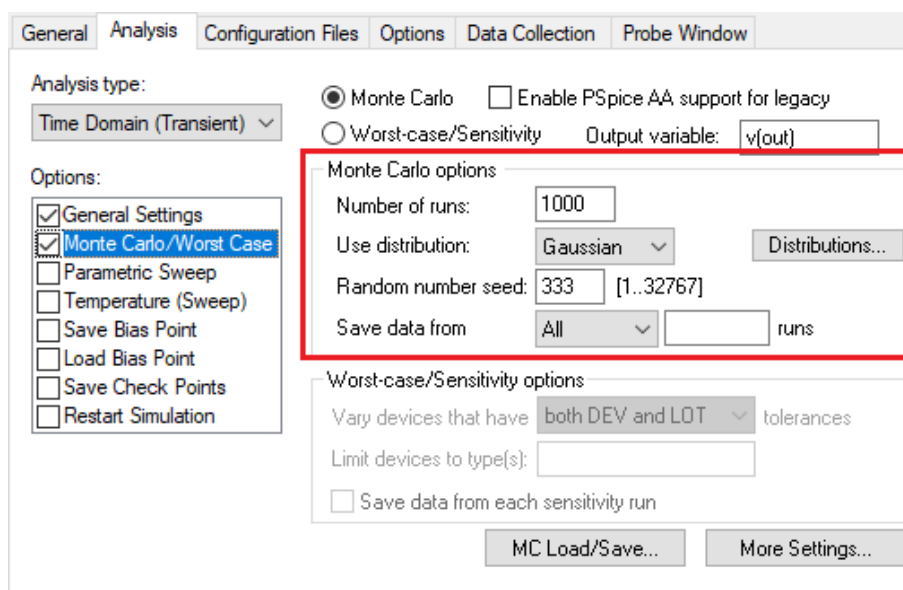
Obr. 5.3: Nastavení analýzy nejhoršího případu.

V nastavení na obrázku 5.3 je zadaná výstupní veličina (Output variable), pro kterou se nejhorší případ stanovuje. Následně jsou nastaveny použité tolerance a pod tlačítkem *More Settings...* jsou ukryty možnosti nastavení hledaného nejhoršího případu. Výsledky po provedení analýzy nejhoršího případu se zapíší do výstupního souboru.

## Analýza Monte Carlo

Analýza Monte Carlo, zkoumá vlastnosti obvodu, ve kterém jsou parametry modelů součástek náhodně vybírány z tolerančního pásma. Náhodným výběrem hodnot se simuluje hromadná výroba. Pravděpodobnost výběru hodnoty z tolerančního pásma závisí na distribuční funkci. Analýza probíhá ve smyčce. V první iteraci jsou použity jmenovité hodnoty, následně jsou náhodně vygenerovány nové hodnoty parametrů z tolerančního pásma a je znovu provedena simulace. Počet iterací se obvykle pohybuje v řádu stovek až tisíců. Analýza je vhodná pro statistické posouzení vlastností obvodu. Jedním z cílů je stanovení výtěžnosti výroby, což je poměr obvodů splňujících zadané požadavky vztažený k celkovému počtu analyzovaných obvodů.

Analýzu Monte Carlo lze provést v kombinaci se stejnosměrnou, střídavou nebo časovou analýzou, nastavení je na obrázku 5.4.



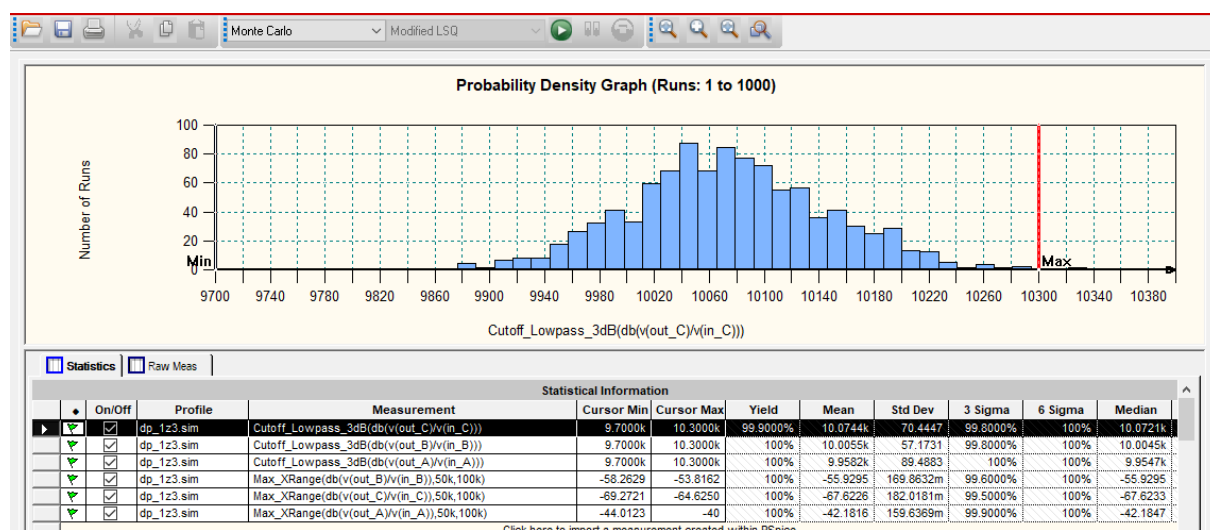
Obr. 5.4: Nastavení analýzy Monte Carlo.

V nastavení na obrázku 5.4 se zadává:

- *Number of runs* – počet iterací
- *Use distribution* – nastavení distribuce
- *Random number seed* – základ pro generování náhodných čísel
- *Save data from* – nastavení ukládání dat

Po dokončení simulace je možné v editoru Probe zobrazit svazek výsledných průběhů, který lze dále statisticky zpracovat. K tomuto zpracování slouží nástroj Performance Analysis, který umožňuje provádět statistické výpočty s celým svazkem charakteristik. Nástroj Performance Analysis se spouští v editoru Probe skrz nabídku *Trace > Performance Analysis*. Zobrazí se souřadnicový systém, do kterého lze skrze *Trace > Add Trace...* zadat měřicí funkci. Výsledky se zobrazí formou histogramu. Další statistické údaje jsou uvedeny v tabulce pod histogramem.

Další možností je provést analýzu Monte Carlo v modulu rozšířených analýz. Postup je analogický s citlivostní analýzou. Po dokončení analýzy je zobrazen histogram s kurzory pro výběr minimální a maximální dovolené hodnoty měřicí funkce. Z vybraného rozsahu se následně počítá výtěžnost výroby (Yield), uvedená v tabulce pod histogramem.



Obr. 5.5: Výsledky analýzy Monte Carlo v modulu rozšířených analýz.

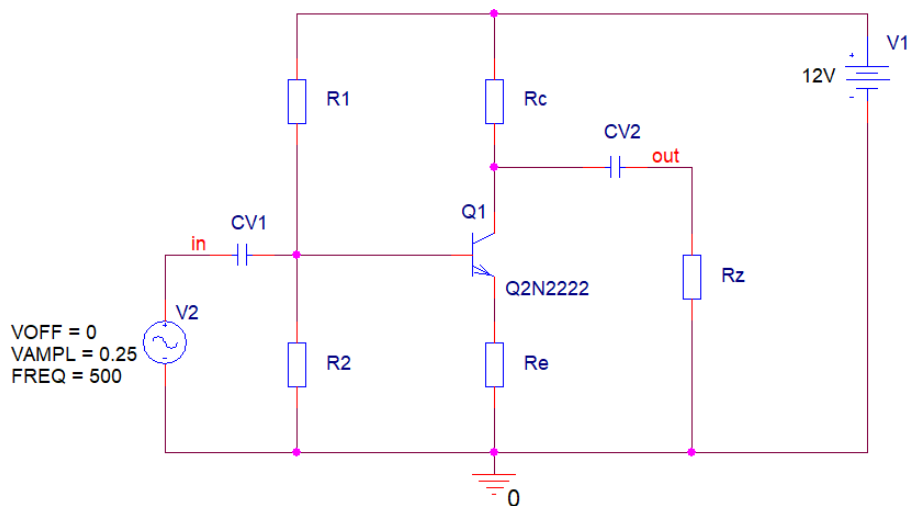
## 5.2 zadání laboratorní úlohy

Část A:

1. Navrhnete tranzistorový zesilovač pracující ve třídě A podle schématu na obrázku 5.6. Dle následujících parametrů: napěťové zesílení  $A_u = 10$ , napájecí napětí  $U_{cc} = 12\text{ V}$ , pracovní proud kolektoru  $I_C = 1\text{ mA}$ , vazební kapacity  $C_{v1} = C_{v2} = 5\text{ }\mu\text{F}$ , parametr  $h_{21E} = 250$ . Hodnoty rezistorů vyberte z řady E24 s tolerancí 5 %.
2. Proveďte analýzu v časové oblasti, vykreslete průběhy vstupního a výstupního napětí, stanovte zesílení v dB. Pro simulaci zadejte  $R_z = 500\text{ M}\Omega$  (nezatížený zesilovač).
3. Stanovte semirelativní citlivost stejnosměrného pracovního bodu ( $I_c$ ,  $U_{ce}$ ) a napěťového zesílení na hodnotách rezistorů. Pro výsledky analýzy nejhoršího případu stanovte rozsahy hodnot zesílení napětí  $U_{ce}$  a proudu  $I_c$ .
4. V závěru se vyjádřete k získaným výsledkům.

Část B:

1. Pomocí softwaru, nebo výpočtem navrhnete aktivní dolní propust 4. řádu pro mezní kmitočet  $f_0 = 2\text{ kHz}$ . Rezistory a kapacitory volte z řady E24 s tolerancí 5 %.
2. Metodou Monte Carlo vykreslete svazky amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky.
3. Stanovte výtěžnost výroby pro interval 1900 Hz až 2100 Hz mezního kmitočtu pro tolerance pasivních součástek 5 % a 1 %. Pro tento výpočet použijte Gaussovu distribuci.
4. V závěru se vyjádřete k získaným výsledkům.



Obr. 5.6: Schéma transistorového zesilovače.

## 5.3 Vzorové řešení

### Část A

#### 1. návrh hodnot rezistorů

$$R_c = \frac{\frac{1}{2}U_1}{I_c} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 12}{0,001} = 6000 \, \Omega$$

$$R_e \approx \frac{R_c}{A_u} = \frac{6000}{10} = 600 \, \Omega$$

$$I_B = \frac{I_c}{h_{21E}} = \frac{0,001}{250} = 4 \, \mu A$$

$$I_{R1} = I_{R2} = 8 \cdot I_B = 8 \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 32 \, \mu A$$

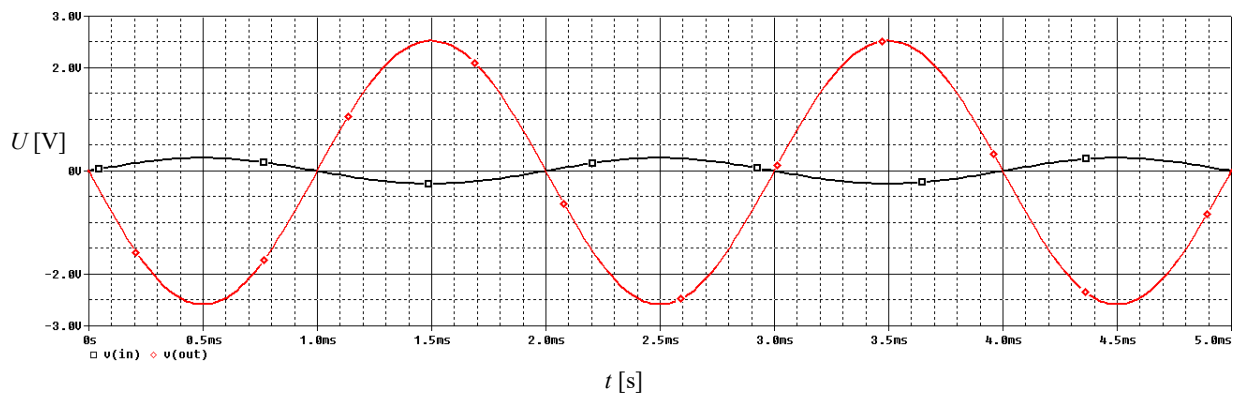
$$R_2 = \frac{U_{be} + R_e I_c}{I_{R1}} = \frac{0,66 + 600 \cdot 0,001}{32 \cdot 10^{-6}} = 39.375 \, k\Omega$$

$$U_{R1} = U_{CC} - (U_{BE} + R_e I_c) = 12 - (0,66 + 600 \cdot 0,001) = 10,74 \, V$$

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_{R1}} = \frac{10,74}{32 \cdot 10^{-6}} = 335,625 \, k\Omega$$

Navržené hodnoty z řady E24:  $R_c = 6,8 \, k\Omega$ ,  $R_e = 620 \, \Omega$ ,  $R_1 = 330 \, k\Omega$ ,  $R_2 = 39 \, k\Omega$ .

#### 2. časové průběhy vstupního napětí, výstupního napětí a zesílení



Obr. 5.7: Průběhy vstupního (černě) a výstupního (červeně) napětí.

Měřicí funkce pro stanovení napěťového zesílení v dB:  $20 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{Max}(V(\text{out}))/\text{Max}(V(\text{in})))$

$$|A_u|_{\text{dB}} = 20 \cdot \log\left(\frac{2.52537}{0.24996}\right) = 20,08907 \, \text{dB}$$

#### 3. citlivostní analýza a analýzy nejhoršího případu

Citlivost stejnosměrného pracovního bodu

Pro zjištění citlivosti pracovního bodu je vytvořen druhý simulační profil, ve kterém je nastavena DC analýza podle obrázku 5.8.

Analysis type:

Options:

- ☒ Primary Sweep
- ☐ Secondary Sweep
- ☐ Monte Carlo/Worst Case
- ☐ Parametric Sweep
- ☐ Temperature (Sweep)
- ☐ Save Bias Point
- ☐ Load Bias Point

Sweep variable

☒ Voltage source    Name:

☐ Current source    Model type:

☐ Global parameter    Model name:

☐ Model parameter    Parameter name:

☐ Temperature

Sweep type

☐ Linear    Start value:

☐ Logarithmic    Decade     End value:

☐ Value list    Increment:

☒ Value list   

Obr. 5.8: Nastavení DC analýzy pro zjištění citlivosti.

Zadané měřicí funkce jsou:

- Pro proud  $I_c$ : ic(Q1)
- Pro napětí  $U_{ce}$  V(Q1:c,Q1:e)

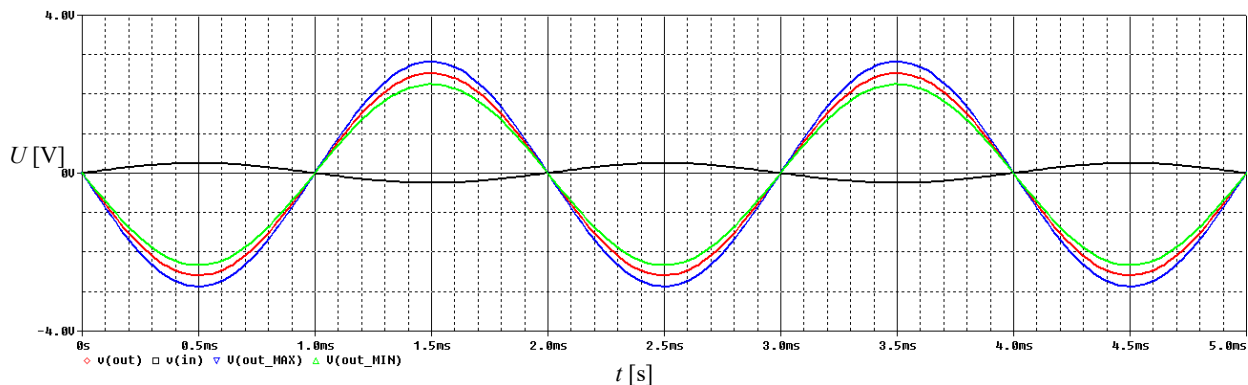
Všechny měřicí funkce jsou následně importovány do modulu rozšířených analýz.

Tab. 9: Výsledky citlivostní analýzy.

Veličina	Součástka	Relativní citlivost
$ A_u _{dB}$	R1	-15,7796m
	R2	12,3517m
	Rc	85,5350m
	Re	-83,3159m
$U_{ce}$	R1	95,4641m
	R2	-82,5290m
	Rc	-49,5287m
	Re	34,0933m
$I_c$	R1	-12,8573u
	R2	11,1154u
	Rc	-129,6027n
	Re	-5,2073u

	On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	transient.sim	20* LOG10(Max(V(out))/Max(V(in)))	20.0891	19.0652	21.0630
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	ss_prac_bod.sim	ic(Q1)	742.7604u	603.6126u	901.5421u
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	ss_prac_bod.sim	V(Q1:c,Q1:e)	6.4858	5.0440	7.6996

Obr. 5.9: Výsledky analýzy nejhoršího případu pro zesilovač.



Obr. 5.10: Průběhy vstupního a výstupního napětí zesilovače pro nejhorší případ (modře maximální, zeleně minimální hodnota zesílení).

#### 4. závěr

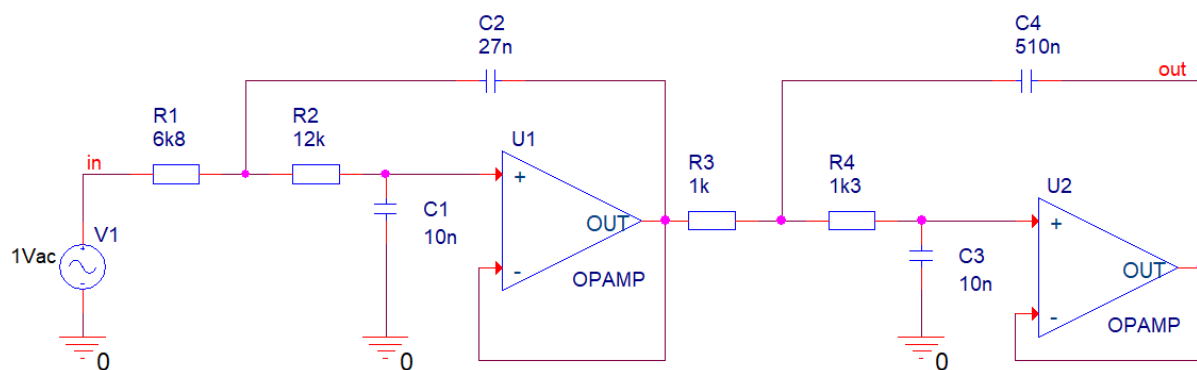
V tabulce 9 je vidět, že hodnota zesílení je nejcitlivější na hodnoty rezistorů  $R_c$  a  $R_e$ . Pokud se hodnota rezistoru  $R_c$  zvýší, zvýší se i zesílení. Podobně, pokud se hodnota rezistoru  $R_e$  zvýší, pak se zesílení sníží. Tyto změny odpovídají teoretickému předpokladu, protože  $|A_u| \approx \frac{R_c}{R_e}$ . Největší citlivost má poloha pracovního bodu vůči hodnotám rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ . Například při zvýšení hodnoty odporu  $R_1$  se napětí  $U_{ce}$  zvýší, protože teče menší proud do báze.

Zjištěný rozsah zesílení je od 19 db do 21 dB. Rozsah napětí  $U_{ce}$  je od 5 V do 7,7 V a rozsah proudu  $I_c$  je od 0,604 mA do 0,902 mA.

### Část B

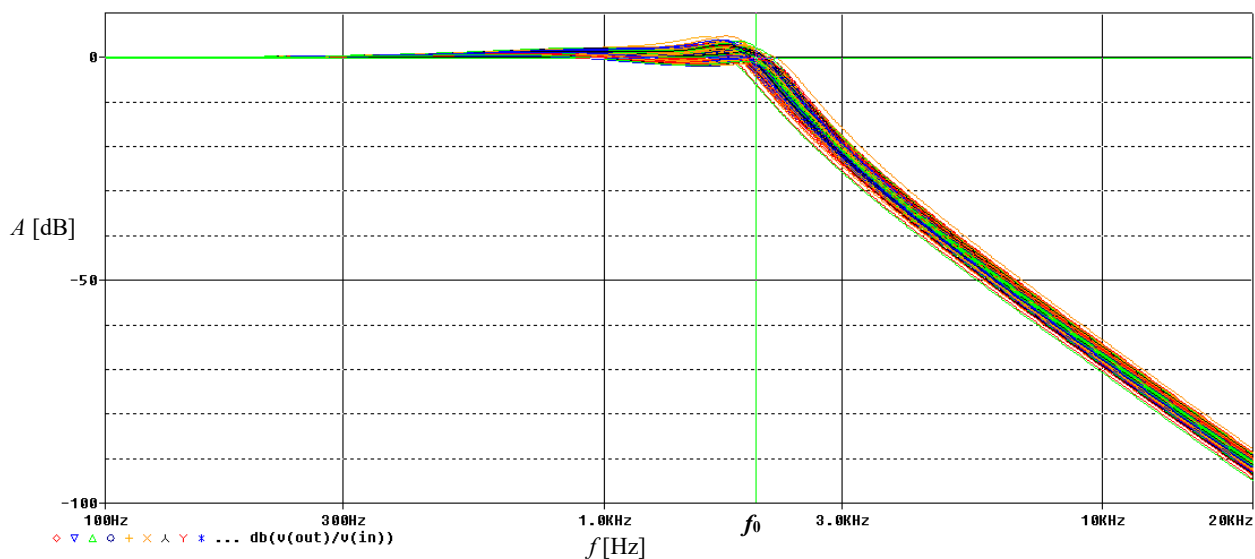
#### 1. návrh filtru

Filtr 4. řádu je vytvořen kaskádním řazením dvou filtrů 2. řádu. Oba filtry mají topologii Sallen-Key a jsou navrženy pro mezní kmitočet  $f_0 = 2$  kHz. Jsou použity ideální operační zesilovače. Schéma výsledného filtru je na obrázku 5.11.

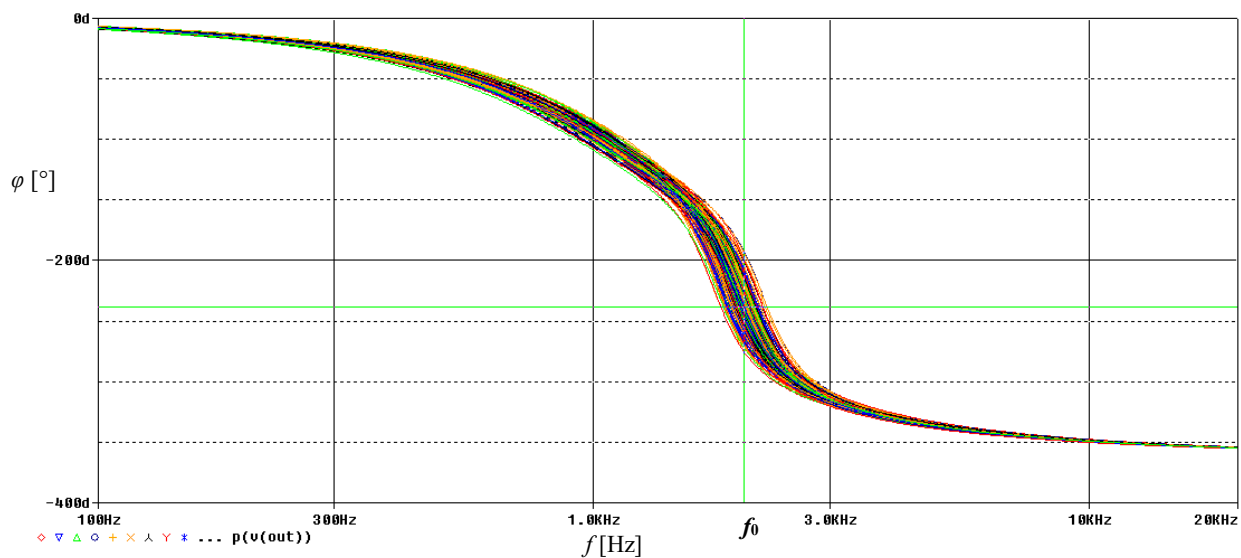


Obr. 5.11: Dolní propust 4. řádu.

## 2. svazky amplitudových a fázových frekvenční charakteristik



Obr. 5.12: Amplitudové charakteristiky dolní propusti.



Obr. 5.13: Fázové charakteristiky dolní propusti.

## 3. stanovení výtěžnost výroby

Použitá měřicí funkce:  $\text{Cutoff\_Lowpass\_3dB}(\text{db}(\text{v}(\text{out})/\text{v}(\text{in})))$

Výtěžnost výroby vychází pro  $1900 < f_0 < 2100$  68 % při tolerancích rezistorů a kapacitorů 5 %.

Pro tolerance 1 % vychází výtěžnost 99,8 %.

## 4. závěr

Zobrazené charakteristiky názorně ilustrují, jaký vliv na funkci zapojení mají tolerance pasivních prvků. Další užitečné údaje získané statistickým zpracováním doplňují zobrazené charakteristiky o praktické informace použitelné při analýze hromadné výroby. Také lze vidět, že snížení tolerancí v tomto případě výrazně zlepšilo spolehlivost obvodu a tím zvýšilo výtěžnost výroby.



## 6 Závěr

Práce dle zadání obsahuje popis možností statistické a toleranční analýzy v prostředí OrCAD. Popsané analýzy představují důležitou součást návrhu obvodů, protože umožňují prověřit, jak bude obvod fungovat při použití reálných součástek vyráběných v modelových řadách s danými tolerancemi. Kromě součástek vyráběných s tolerancemi vznikají odchylky i v důsledků jiných vlivů, jako je například teplota. I tyto vlivy jde pomocí statistické analýzy zahrnout do návrhového procesu. Výsledkem je shrnutí problematiky simulací s ohledem na odchylky parametrů.

Práce obsahuje rozbor jednotlivých částí pracovního postupu při provádění analýz. K popisu zadání tolerancí a distribucí je přidán popis významu zadávaných veličin. Součástí je i stručný úvod do tolerančního designu, který je jedním z hlavních využití statistické a toleranční analýzy. Rozbor citlivostní analýzy, analýzy nejhoršího případu a analýzy Monte Carlo obsahuje příklady použití včetně nastavení simulací a zobrazených výsledků. Vytvořena laboratorní úloha pro použití ve výuce obsahuje 2 části zahrnující základní aspekty toleranční analýzy. K úloze je vytvořen sylab a také je doplněná o vzorové řešení. Přínos tak spočívá ve vytvoření textu s uceleným úvodem do problematiky statistické a toleranční analýzy v prostředí OrCAD.

Téma této práce je poměrně rozsáhlé, další rozvoj tématu je příhodný pro oblasti jako je výkonová elektronika, elektromagnetická kompatibilita nebo životnost komerční elektroniky.

## Seznam použité literatury

- [1] FITZPATRICK, Dennis. *Analog design and simulation using OrCAD Capture and PSpice*. 2nd ed. Oxford, UK.: Conner, 2018. ISBN 978-0-08-102505-5.
- [2] *Model Library* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.pspice.com/model-library>
- [3] PSpice Advanced Analysis Option. *PSpice* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.pspice.com/technology/pspice-advanced-analysis-option>
- [4] KOLKA, Zdeněk. *Modelování a simulace pomocí PSpice*. Brno: Tribun EU, 2011. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-293-4.
- [5] GAJDOŠÍK, Libor. *Návrh analogových filtrů*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-468-2.
- [6] BÍLKOVÁ, Diana, Petr BUDINSKÝ a Václav VOHÁNKA. *Pravděpodobnost a statistika*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2009. ISBN 978-80-7380-224-0.
- [7] REKTORYS, Karel. *Přehled užití matematiky*. 4. Spálená 51, 113 02 Praha 1: Nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-003-81.
- [8] GAJDOŠÍK, Libor. *Metody analýzy lineárních obvodů* 2. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-428-6.
- [9] SPENCE, Robert a Randeep Singh SOIN. *Tolerance design of electronic circuits*. 1nd ed. London: Imperial College Press, 1997. ISBN 1-86094-040-4.
- [10] Cadence Design Systems, Inc.: *PSpice User Guide*. Cadence Design Systems, Portland, 2000.

## Seznam příloh

Číslo přílohy	Popis
1	Příloha v IS EDISON: projekt v softwaru OrCAD k 1. příkladu
2	Příloha v IS EDISON: projekt v softwaru OrCAD k 2. příkladu
3	Příloha v IS EDISON: projekt v softwaru OrCAD k 3. příkladu
4	Příloha v IS EDISON: projekt v softwaru OrCAD k 4. příkladu
5	Příloha v IS EDISON: projekt v softwaru OrCAD k 5. příkladu
6	Příloha v IS EDISON: projekt v softwaru OrCAD k 7. příkladu
7	Příloha v IS EDISON: projekt v softwaru OrCAD k části A laboratorní úlohy
8	Příloha v IS EDISON: projekt v softwaru OrCAD k části B laboratorní úlohy